

Ⅱ-100 電力系統の電圧無効電力制御に関する基礎研究

西 山 栄 枝

Foundamental Research for Voltage and Reactive Power Control of Power System

Sakae NISHIYAMA

第4章 電圧無効電力の計算機制御に関する基礎 理論

(4.1) 電圧無効電力の計算機制御

これまで、電力系統の電圧調整では、発電機や同期調相機などに自動電圧調整器が設けられ、負荷時電圧調整器 (L. R. C.) の操作を一部自動化するとか、配電線ではスイッチ付キャパシタを使用するなど、局所的自動化ないしは自動制御の試みが採られてきた。しかし大半の調整設備は、一日数回時間的スケジュールまたは給電指令所からの指令によって自動調整されており、時々刻々変動する電圧無効電力の変動に対処して適切な操作を行なうという段階には達していない。

最近になって、ようやく変電所の電圧や、幹線無効電力の調整を自動化する試みが採られるようになり、各電力会社で研究が進められて東北電力や中国電力で実用化されたことは第1章で述べた。このような試みは、変電所の電圧無効電力の制御方式として、画期的なものであり注目に値するが、その制御が変電所単位で行なわれている点まだ局所的であり、系統全体からみた場合、充分協調のとれた制御とはいえない。すなわち変電所単位で自動化している限り、おのずから調整設備の調整能力に制限があり近接変電所からの適切な応援が得られないので、常時満足な制御を行ない得ないことや、その変電所の制御により近傍変電所の電圧および無効電力潮流の変化を思わしくない方向に助長するなどの欠点がある。

このような欠点を除くためには、変電所単位の自動制御を発展させ、数個所の電気所（発電変電所）を含む適正規模の系統を1グループとし、各電気所間で相互協調のとれた制御方式に改めることが必要である。すなわち、グループ内のある地点で電圧変動が検出された場合、どの電気所でどのような調整を行ないば最も効果的であるかを総合的に判断し、その結果に基づい

て制御を実施することが望まれる。

このような制御を実施する場合の計算は後節で述べるように、原則として多元連立不等式となり、しかもこの計算はオンラインで迅速に計算しなければならないので、計数型電子計算機を使用することが望ましい。特に系統規模が大きくなると、それに応じて方程式の数および変数の数が一段と増加するので、計数型電子計算機の使用がより効果的となる。このように計数型電子計算機を使用し、適正規模の系統を1グループとして、電圧無効電力の制御を実施する制御方式を“系統の電圧無効電力の計算機制御”と呼称する。この制御方式を採用する場合に想定される構成図を示せば第4.1図のようになる。

ここでは、新しい電力系統の電圧無効電力の制御方式としての系統の電圧無効電力の計算機制御を提案すると共に、その場合の基本方程式の特異性および方程式の計算方法について述べる。

(4.2) 電圧無効電力制御の基本方程式

電力系統の電圧無効電力の制御は、各発電変電所に設置された負荷時電圧調整器 (L. R. C.) 静止形調相設備 (SC, S_hR) および発電機によって行なわれる。これらの諸設備を使用して制御する場合の基本方程式は各節で述べるが、その前に基本方程式を誘導し、前章に述べた系統特性定数との関連をはっきりさせるため次の諸量を定義する。

V_{oi}, Q_{oi} ; i 地点の電圧無効電力の実測値

V_{ri}, Q_{ri} ; i 地点の電圧無効電力の運転目標値

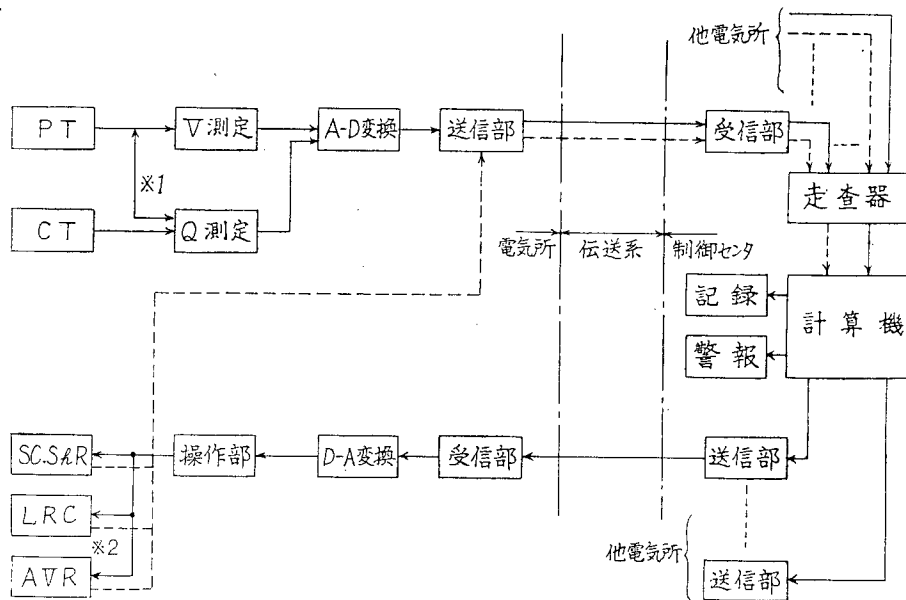
v_{di}, q_{di} ; i 地点の電圧無効電力の実測値と目標値との差

$\varepsilon_{vi}, \varepsilon_{qi}$; i 地点の電圧無効電力の許容偏差

v_{ci}, q_{ci} ; 制御動作による i 地点の電圧無効電力の回復分

n_{j1} ; j_1 地点の L. R. C. タップ操作量

y_{j2} ; j_2 地点の静止形調相設備操作量



第 4.1 図 電圧無効電力制御系構成図 (デジタル伝送方式)

※ 1 ; 送電線の無効電力を制御する場合, あるいは送電損失を考慮する場合

※ 2 ; 発電機の無効電力を制御する場合

q_{j3} ; j_3 地点の発電機無効電力操作量

α_{ij1} ; j_1 地点の L. R. C. を 1 タップ操作したとき, i 地点の電圧の回復分を示す係数とする。 b_{ij2} , c_{ij3} , d_{ij1} , e_{ij2} , f_{ij3} についても同様

(4.2.1) 整定条件

さきに定義した諸量によって, 電圧無効電力の変動を許容変動範囲内に維持するための整定条件は次式で表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \text{abs.}[v_i] &= \text{abs.}[v_{di} + v_{ei}] \leq \text{abs.}[\varepsilon_{vi}] \\ \text{abs.}[q_i] &= \text{abs.}[q_{di} + q_{ei}] \leq \text{abs.}[\varepsilon_{qi}] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(4-1)$$

但し, $\text{abs.}v_i$ は v_i の絶対値を示す。

定義により, v_{di} , q_{di} は (4-2) 式, (4-3) 式によって表わされ, v_{ei} , q_{ei} は前章の系統特性定数より明らかのように, (4-4) 式および (4-5) 式で表わされる。

$$v_{di} = V_{oi} - V_{ri} \quad \dots\dots\dots(4-2)$$

$$q_{di} = Q_{oi} - Q_{ri} \quad \dots\dots\dots(4-3)$$

$$v_{ei} = \sum_{j1=1}^{J1} \alpha_{ij1} n_{j1} + \sum_{j2=1}^{J2} b_{ij2} y_{j2} + \sum_{j3=1}^{J3} c_{ij3} q_{j3} \quad \dots\dots\dots(4-4)$$

$$q_{ei} = \sum_{j1=1}^{J1} d_{ij1} n_{j1} + \sum_{j2=1}^{J2} e_{ij2} y_{j2} + \sum_{j3=1}^{J3} f_{ij3} q_{j3} \quad \dots\dots\dots(4-5)$$

これらの式からも明らかのように, 電圧無効電力の

変動を ε_{vi} , ε_{qi} の許容変動範囲に維持するためには, 負荷時電圧調整器 (n_{j1}), 静止形調相設備 (y_{j2}) および発電機の無効電力 (q_{j3}) を調整すればよい。

(4.2.2) 制御変数の制限条件

負荷時電圧調整器, 静止形調相設備および発電機による電圧無効電力の調整には, 設備容量および運転上の制限により, 上下限の制限条件がある。この制限条件を次のように表わす。

$$\underline{N}_{j1} \leq N_{oj1} + n_{j1} \leq \bar{N}_{j1} \quad \dots\dots\dots(4-6)$$

$$\underline{Y}_{j2} \leq Y_{oj2} + y_{j2} \leq \bar{Y}_{j2} \quad \dots\dots\dots(4-7)$$

$$\underline{Q}_{qj3} \leq Q_{oj3} + q_{j3} \leq \bar{Q}_{qj3} \quad \dots\dots\dots(4-8)$$

ただし, N_{oi1} , Y_{oj2} , Q_{oj3} は制御実施前の値, 即ち初期値であり, 制御が行なわれるたびにリセットされる。また, \bar{N}_{j1} , \underline{N}_{j1} はそれぞれ, 負荷時電圧調整器の上下限値を示し, \bar{Y}_{j1} , \underline{Y}_{j2} は調相設備の上下限値, \bar{Q}_{qj3} , \underline{Q}_{qj3} は発電機無効電力制御上の上下限値を示す。

(4.2.3) 目的関数

電力系統の電圧無効電力制御を行なう場合には, 電圧無効制御の必要性のところで述べたように, 合理的な系統運用の立場から, 系統の無効電力潮流による送電損失を極力少なくしたいとか, 調相設備の動作回数を少なくしたいというような要求を伴う場合がでてくる。あるいは積極的に無効電力潮流による送電損失を最小にするという条件のもとで電圧制御を実施する

というような場合もある。このような場合には、無効電力潮流による送電損失および調相設備の動作回数を目的関数として、前述の整定条件を満足する諸設備の調整を計ればよい。

無効電力潮流による送電損失を目的関数とした場合にはそれが制御変数の二次式、調相設備の動作回数を目的関数とした場合にはそれが制御変数の一次式となる。したがって、前者の解法が得られれば、それを後者の場合に適用することは容易である。実際、負荷時電圧調整器の動作（１タップ操作）に要する費用は、ほぼ 1KWH の発電原価に相当することや、その寿命動作回数が年々増加することなどから考えて、負荷時電圧調整器の動作により、それ以上の費用節減ができれば、目的関数として考慮しなくともよいことになる。したがって、現時点で動作回数を目的関数にするならば、負荷時電圧調整器の動作回数よりも、動作費用がほぼ 10 倍程度といわれる静止形調相設備の場合であろう。このため筆者は、目的関数が二次式の場合の解法が開発できれば、目的関数が一次式の場合にも容易に応用できることと、制御装置の動作費用の面から考えて、主として目的関数が二次式になる場合の解法の開発を試みた。

いま無効電力潮流による送電損失 L を目的関数にとれば、

$$\begin{aligned} \min_{(n, y, q_g)} L &= \min_{(n, y, q_g)} \sum_{k=1}^K r_k Q_{tk}^2 \\ &= \min_{(n, y, q_g)} \sum_{k=1}^K r_k (Q_{otk} + q_{sk})^2 \\ &\dots\dots\dots (4-9) \end{aligned}$$

ただし、

k ; 送電線の番号
 r_k ; k 送電線の抵抗値
 Q_{tk} ; 制御実施の k 送電線の無効電力潮流
 Q_{otk} ; k 送電線の制御実施前の無効電力潮流
 q_{tk} ; 制御実施による k 送電線の無効電力潮流の変化分

で表わされる（ただし、電圧変化による送電損失の変化分は非常に少ないので省略し、電圧の値は 100 パーセントとしている）。(4-9) 式で、無効電力潮流の変化分は、各電気所の電圧無効電力の変化分の場合と同様次式で表わされる。

$$\begin{aligned} q_{tk} &= \sum_{j=1}^{J_1} d_{kj1} n_{j1} + \sum_{j=2}^{J_2} e_{kj2} y_{j2} + \sum_{j=3}^{J_3} f_{kj3} q_{gj3} \\ &\dots\dots\dots (4-10) \end{aligned}$$

したがって、無効電力潮流による送電損失を目的関数にとったときの電圧無効電力制御の問題は、(4-1)、

(4-2) 式を整定条件とし、(4-6)~(4-8) 式の制限条件のもとで、(4-9) 式の目的関数を最小にする解を求めて制御する問題となる。

ここで、以上の各式を一般式として取扱うために、諸変数および諸定数を次の如く表わすことにする。

- (i) 制御偏差 ; $v, q \longrightarrow f$.
- (ii) 許容偏差 ; $\varepsilon_v, \varepsilon_q \longrightarrow \varepsilon$,
- (iii) 制御変数 ; $n, y, q_g \longrightarrow x$
 $N, Y, Q_g \longrightarrow X$

- (iv) 送電線の無効電力潮流
 $q_{tk}, Q_{otk} \longrightarrow g_k, G_{ok}$

- (v) 系統特性定数 ; $a, b, c, d, e, f \longrightarrow a$,

これらの記号を使用すれば、電圧無効電力制御の問題は次の一般形で表わすことができる。

$$\begin{aligned} \text{abs.}[f_i] &= \text{abs.}([f_{di}] + [a_{ij}][x_j]) \\ &\leq \text{abs.}[\varepsilon_i] \dots\dots\dots (4-11) \end{aligned}$$

$$X_j \leq X_{oj} + x_j \leq \bar{X}_j \dots\dots\dots (4-12)$$

$$[q_k] = [a_{kj}][x_j] \dots\dots\dots (4-13)$$

$$\begin{aligned} \min_{(x_j)} L &= \min_{(x_j)} \sum_{k=1}^K r_k G_k^2 \\ &= \min_{(x_j)} \sum_{k=1}^K r_k (G_{ok} + g_k)^2 \dots\dots\dots (4-14) \end{aligned}$$

但し、 $\text{abs.} f_i$ は f_i の絶対値を示すものとし、 i, j, k のとり得る値は、 $i=1 \sim n, j=1 \sim J, k=1 \sim K$ とする。

(4.3) 電圧無効電力制御の特異性

前述したように、(4-11)~(4-14) 式で表わされる電圧無効電力制御の問題には、下記のような特異性がある。

- (1) 制御変数 x_j のうち負荷時電圧調整器および静止形調相設備については、整数解を必要とすること。これは負荷時電圧調整器および調相設備の動作機構が階段的になっているために生ずるのである。
- (2) 整定条件の式の数と制御変数 x_j の数が一致していないこと。これは制御変数として負荷時電圧調整器、静止形調相設備および発電機があり、その数は $J(J_1 + J_2 + J_3)$ 個であるのに対し、(4-11) 式で表わされる整定条件の数は、一般に $J > n$ であるためである。
- (3) 絶対値付不等式であること、すなわち整定条件に絶対値がついていることである。これは電圧無効電力の許容変動範囲が、運転目標値に対し正負の許容範囲があるからである。
- (4) 目的関数が一次式でない場合があること。すなわち無効電力潮流による送電損失を目的関数にと

れば、制御変数の二次式、調相設備の動作回数を目的関数にとれば、制御変数の一次式となる。

(5) 計算を一定時間以内に実施しなければならないこと。これは電圧無効電力制御の計算がオンラインで行なわれるものであるから特に重要なことである。

(6) 制御変数 x_j の制限条件が制御実施毎に変更されること。これは(4—12)式で表わされる制御変数の初期値 X_{0j} が、制御実施ごとにリセットされることである。

(4.4) 目的関数を考慮しない場合の解法

電圧無効電力制御の一般式は(4—11)～(4—14)式で表わされ、前述のような特異性がある。しかし送電線長が比較的短かく、無効電力潮流による送電損失が微小の場合とか、調整設備の動作回数について特に留意する必要のない場合には、単に電圧無効電力の変動を許容範囲内に維持すればよい。したがって、電圧無効電力制御を実施しても、目的関数を考慮する必要がなくなり、単に(4—12)式の制限条件のもとで、(4—11)式の整定条件である連立不等式を解く問題になる。このような場合を想定し、電圧無効電力制御の第一段階として、目的関数を考慮しない場合の解法について述べる。

(4.4.1) 繰返し座標変換法

繰返し座標変換法は、その計算法があたかも繰返し座標変換を行なっているように見做されるところから、繰返し座標変換法と呼んだものである。いま(4—11)式の連立不等式を次のように表わすことにする。

$$[-\varepsilon_i] \leq [f_{di}] + [a_{ij}][x_j] \leq [\varepsilon_i] \quad (4-15) \\ i=1 \sim n, j=1 \sim J.$$

この式で $[f_{di}]$ の項を移項すれば、

$$[-\varepsilon_i] - [f_{di}] \leq [a_{ij}][x_j] \leq [\varepsilon_i] - [f_{di}] \quad (4-16)$$

となる。ここで j 回目の繰返し計算で求めるべき制御変数 x_j を x_j^j で表わすことにすれば、

$$x_j^j = x_j^{j-1} + \Delta x_j^j \quad (4-17)$$

但し、 x_j^j の右肩の j は繰返し計算回数を示すものとする。

この関係を(4—16)式に代入し、 $[f_{di}]$ と同様 $[a_{ij}][x_j^{j-1}]$ を移項すれば、次式が得られる。

$$[A_i] \leq [a_{ij}][\Delta x_j^j] \leq [B_i] \quad (4-18)$$

ただし

$$[A_i] \equiv [-\varepsilon_i] - [f_{di}] - [a_{ij}][x_j^{j-1}]$$

$$[B_i] \equiv [\varepsilon_i] - [f_{di}] - [a_{ij}][x_j^{j-1}]$$

この計算で制御変数 $[x_j]$ が常に整数をとるようにし、 $[A_i] \leq 0$ 、 $[B_i] \geq 0$ の条件が満足されるようになるまで、繰返し計算を続ける。 j 回目の繰返し計算で整定条件を満足したときに、 $[a_{ij}][\Delta x_j^j]$ の項は正負の値で囲まれているから、 $[\Delta x_j^j] = 0$ とすばは、 $[x_j^{j-1}]$ は(4—15)式を満足する解となり、(4—11)式の整定条件を満足する整数解であることが解る。

この計算方法で、制御変数 $[x_j]$ の中に、発電機による調整のように連続調整が可能なものがあれば、その制御変数には任意の値がとれるようにして計算を進めればよい。したがって、この計算方法は、制御変数が総て整数解を必要とする場合ばかりでなく、一部の制御変数だけが整数解を必要とする場合にも使用できる。

この計算方法を使用するときの問題点は、座標変換を行なうべき制御変数の選定順序により、計算時間が相当変るので、制御変数の選定順序を適切に決めることが必要である。

(4.4.2) 判定関数 $E(x_j)$ を使用する方法

本方法は、(4—11)、(4—12)式で表わされる電圧無効電力制御の基本式に、新たに(4—19)式で表わされる判定関数 $E(x_j)$ を定義し、連立不等式を解く方法である。

$$E(x_j) = E(x_1, x_2, \dots, x_J) \\ = (f_1/\varepsilon_1)^2 + (f_2/\varepsilon_2)^2 + \dots + (f_n/\varepsilon_n)^2 \\ = \sum_{i=1}^n (f_i/\varepsilon_i)^2 \quad (4-19)$$

ここで定義した判定関数 $E(x_j)$ は常に正の値をとり、凹関数であるから、判定関数 $E(x_j)$ の極値は $E(x_j)$ の最小値となる。したがって、 $\partial E(x_j)/\partial x_j = 0$ より、 $E(x_j)$ を最小にする制御変数 x_j が求められる。

判定関数を使用し、できるだけ一意的に整定条件を満足する制御変数 x_j を求めようとすれば、判定関数 $E(x_j)$ を x_1, x_2, \dots, x_J により偏微分し計算する方法がある。即ち、

$$\frac{\partial E(x_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial E(x_j)}{\partial f_i} \cdot \frac{\partial f_i}{\partial x_j} = 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i}{\varepsilon_i^2} \right) a_{ij} = 0 \\ \text{但し、} j=1 \sim J \quad (4-20)$$

の連立方程式を計算する方法である。この式に(4—11)式を代入して整理すれば、(4—21)式が求められる。この連立方程式は、 $[J \cdot n]$ マトリクスで表わされ、一般に $J > n$ であるから、(4—21)式の連立方程式から整定条件を満足する解を求める場合 $J-n$ 個の変数は従属となる。したがって、この連立方程式から整定条件を満足する解を求めるためには、 $J-n$ 個の変数を固定し、 n 元連立方程式として解くことになる。

$$\begin{pmatrix} (a_{i1}^2/\varepsilon_i^2) & (a_{i1}a_{i2}/\varepsilon_i^2) & (a_{i1}a_{i3}/\varepsilon_i^2) & \cdots & (a_{i1}a_{iJ}/\varepsilon_i^2) \\ (a_{i2}a_{i1}/\varepsilon_i^2) & (a_{i2}^2/\varepsilon_i^2) & (a_{i2}a_{i3}/\varepsilon_i^2) & \cdots & (a_{i2}a_{iJ}/\varepsilon_i^2) \\ (a_{i3}a_{i1}/\varepsilon_i^2) & (a_{i3}a_{i2}/\varepsilon_i^2) & (a_{i3}^2/\varepsilon_i^2) & \cdots & (a_{i3}a_{iJ}/\varepsilon_i^2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_{in}a_{i1}/\varepsilon_i^2) & (a_{in}a_{i2}/\varepsilon_i^2) & (a_{in}a_{i3}/\varepsilon_i^2) & \cdots & (a_{in}a_{iJ}/\varepsilon_i^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(f_{d_i}a_{i1}/\varepsilon_i^2) \\ -(f_{d_i}a_{i2}/\varepsilon_i^2) \\ -(f_{d_i}a_{i3}/\varepsilon_i^2) \\ \vdots \\ -(f_{d_i}a_{in}/\varepsilon_i^2) \end{pmatrix} \quad (4-21)$$

ただし,

$$(a_{in}a_{im}/\varepsilon_i^2) \equiv \sum_{i=1}^n (a_{in}a_{im}/\varepsilon_i^2)$$

$$(f_{d_i}a_{in}/\varepsilon_i^2) \equiv \sum_{i=1}^n (f_{d_i}a_{in}/\varepsilon_i^2)$$

(4-21) 式の連立方程式から一意的に整定条件を求める方法に対し、繰返し計算により、整定条件を満足する解を求める方法がある。この方法は、 j 回目の繰返し計算のときの x_j , f_i を、それぞれ、

$$\left. \begin{aligned} x_j^j &= x_j^{j-1} + \Delta x_j^j \\ f_i^j &= f_i^{j-1} + f(\Delta x_j^j) \end{aligned} \right\} \quad (4-22)$$

で表わし、この関係を (4-20) 式に代入すれば

$$\sum_{i=1}^n f_i^{j-1} (a_{ij}/\varepsilon_i^2) + \Delta x_j^j \sum_{i=1}^n (a_{ij}^2/\varepsilon_i^2) = 0 \quad (4-23)$$

ゆえに、

$$\Delta x_j^j = - \sum_{i=1}^n f_i^{j-1} (a_{ij}/\varepsilon_i^2) / \sum_{i=1}^n (a_{ij}^2/\varepsilon_i^2) \quad (4-24)$$

したがって、整定条件の式の数と制御変数の数が一致しなくとも、(4-24)式を使用して、(4-19)式で表わされる判定関数を減少させながら、整定条件を満足する制御変数 $[x_j]$ を求めることができる。

(4-24)式によって、制御変数 x_j を計算する場合、 x_j の計算順序を $j=1, 2, 3, \dots, J$ の順に計算する方法と判定関数の微分値によって決める方法がある。後者の方法は $|\partial E(x_j)/\partial x_j|$ の計算をするだけ、前者の方法より計算時間が多くなるけれども、収束するまでの計算回数が前者の場合よりも相当少なくなるので、全体として計算時間が短縮できる。

また判定関数に収束係数を使用すれば、計算時間はさらに短縮できる。この場合の判定関数 $E(x_j)$ は、

$$E(x_j) = \sum_{i=1}^n k_i (f_i/\varepsilon_i)^2 \quad (4-25)$$

で表わされるから、前述の場合と同様 j 回目の繰返し計算で求めるべき x_j の値、即ち Δx_j^j は

$$\Delta x_j^j = - \sum_{i=1}^n (f_i^{j-1} k_i a_{ij}/\varepsilon_i^2) / \sum_{i=1}^n k_i (a_{ij}/\varepsilon_i)^2 \quad (4-26)$$

但し、 k_i は収束係数

で表わされる。収束係数 k_i の値を適切に選び制御変数 x_j の計算順序を $|\partial E(x_j)/\partial x_j|$ によって決定し、繰返し計算を行ないば収束時間は一段とはよくなる。

ここでは、判定関数を使用し多元連立方程式として解く方法と繰返し計算法について述べた。前者の場合、一般的方法としては、クレーマ氏の方法があるが、変数の増加と共に計算時間が飛躍的に増加するため、変数の多いときには使用されない。変数の多い場合の解法として、ガウス法、ドウリットル(Doolittle)法、クラウト(Crout)法およびガウスザイダル(Gauss-Seidel)法などの繰返し計算法がある。このなかで現在よく使用されているガウスザイダル法は多元連立一次方程式の行列で対角線要素が、他の要素に比べて比較的大きい場合は収束時間も比較的速度く、所要の解が得られるけれども、電圧無効電力制御の問題のように、かならずしも対角線要素が大きいとは限らない場合には解を求めるのが困難になる。そのうえ、多元連立一次方程式として、一意的に解を求めようとする方法は、判定関数から一度多元連立一次方程式に変換する必要があることと、多元連立一次方程式を解く場合固定すべき制御変数の選択が難しいこと、および解を整数化したときにならずしも整定条件を満足するとは限らない。このため、さらに計算を必要とするなどの問題があり、電圧無効電力制御の問題を解く方法としては、あまり好ましい方法とは考えられない。

これに対し、(4-24)式または(4-26)式を使用する繰返し計算法は、繰返し計算の都度、制御変数の整数解を求めて計算を行なうので、必ず整定条件を満足する解が得られ、多元連立一次方程式として解く場合のように解の補正を必要としない。また制御変数の計算順序を $|\partial E(x_j)/\partial x_j|$ によって決めれば、収束時間を非常に短縮できる。さらに系統の諸条件を考慮して適切な収束係数を使用すれば、収束時間を一段と短縮できる。したがって、電圧無効電力制御の問題を計算する方法としては、 $|\partial E(x_j)/\partial x_j|$ の値によって、制御変数の計算順序を決める繰返し計算方法が最も適していると考えられる。しかし制御変数のなかに、発電

機のように、連続的に制御できる調整機器が比較的多い場合には、多元連立一次方程式として解いても、容易に整定条件を満足する解が得られる場合もあるので、実際の場合には、系統の諸条件を考慮し計算方法を決めることが必要であろう。

(4.5) 目的関数を考慮した場合の解法

(4.5.1) 目的関数を含んだ判定関数を使用する方法

目的関数を考慮しない場合、(4-19)式で表わされる判定関数を定義したのに対し、目的関数を考慮した場合の判定関数を次のように定義する。

$$E(x_j) \equiv E(x_1, x_2, \dots, x_j) \\ = \sum_{i=1}^n (k_i (f_i / \varepsilon_i)^2 + (k_e \sum_{k=1}^K r_k G_k) / \sum_{k=1}^K r_k G_{ok}^2) \\ = \sum_{i=1}^n k_i (f_i / \varepsilon_i)^2 + k_e L / L_0 \dots \dots \dots (4-27)$$

但し、 k_i , k_e は収束係数

L_0 ; 無効電力潮流による送電損失の初期値

L ; 無効電力潮流による送電損失

この式は(4-19)式の判定関数に、 $k_e L / L_0$ の項を加えただけであるから、 j 回目の繰返し計算で求めるべき x_j の値、 Δx_j^i は次の式で求められる。

$$\Delta x_j^i = -f(f_i, g_k) / f_o \dots \dots \dots (4-28)$$

$$f(f_i, g_k) = \sum_{i=1}^n a_{ij} k_i (f_i^{j-1} / \varepsilon_i^2) +$$

$$(k_e / L_0) \sum_{k=1}^K r_k a_{kj} (g_k^{j-1} + G_{ok})$$

$$f_o = \sum_{i=1}^n k_i (a_{ij} / \varepsilon_i)^2 + (k_e / L_0) \sum_{k=1}^K r_k a_{kj}^2$$

$$\text{ただし、} x_j^i = x_{j-1}^i + \Delta x_j^i$$

$$f_j^i = f_{j-1}^i + f_i(\Delta x_j^i)$$

$$g_k^j = g_{k-1}^j + g_k(\Delta x_j^i)$$

$$G_k^j = G_{k-1}^j + G_k(\Delta x_j^i)$$

ここで問題になるのは目的関数を考慮しない場合と同様、制御変数の計算順序および収束係数であるが、制御変数の計算順序は目的関数を考慮しない場合と同様 $\partial E(x_j) / \partial x_j$ の絶対値の大きさによって、制御変数の計算順序を決めるのが適している。次に制御変数の一回毎の操作量であるが、これは(4-28)式によって Δx_j を計算する方法と $\partial E(x_j) / \partial x_j$ によって操作すべき制御変数を決めて常に制御変数を単位量だけ操作するようにして計算する方法がある。前者の方法は判定関数 $E(x_j)$ が常に極値になるように考えられるが、収束係数のとり方によって、判定関数が凹関数に

ならなくなるような場合には計算の途中で、ハンチング現象を生ずる危険がある。これに対し後者の方法は一見収束が遅いように思われるが、実系統の運転状態では一度に数ステップ操作するような外乱は、まれであるから収束速度はさほど低下せず前者に比較し確実な計算方法といえる。

最後に収束係数のとり方であるが、これには、(i)収束係数を定数とする方法、(ii)収束係数 k_i , k_e を制御偏差 f_i , 送電損失 L および無効電力潮流 G_k の関数にとる方法、(iii)収束係数 k_i , k_e の値を最初単位量として計算を繰返し、 f_i が整定条件を満足したら、その都度 k_e の値を倍にし、判定関数の中で目的関数の占める割合を増加させる量という三種類の方法が考えられる。

第1の方法は判定関数が常に凹関数であるから、繰返し計算により判定関数の値は減少するが、必ずしも目的関数が最小になるとは限らない。しかし与へられた系統でその系統の特性に応じた適切な収束係数を選べば、ほぼ満足すべき値が得られる。第2の方法は収束係数を制御偏差、送電損失などの関数とするため、収束速度は速くなる。その反面判定関数が凹関数でなくなり、繰返し計算に対し、単調な収束が期待できず、場合によってはハンチング現象を越す場合もある。第3の方法は最も確実な方法であり、判定関数の特性上、最初は制御偏差の項が大きく、整定条件を満足する解が得られる。整定条件を満足すれば、 k_e の値を倍にするので、判定関数中で占める目的関数の割合が増加し、目的関数の減少が期待できる。後に試算例のところで示すように、いずれのケースの場合でも第3の方法によれば送電損失最小の解に近い解が得られている。

したがって判定関数に目的関数を加えた場合の計算では、 k_i , k_e の値を最初単位量として繰返し計算を行ない、整定条件を満足したらその都度 k_e の値を倍にし、制御変数を常に単位量だけ操作する計算方法が好ましいといえる。この場合の制御変数の計算順序は当然 $\partial E(x_j) / \partial x_j$ の絶対値の大きさによって決める。

(4.5.2) LP的手法を使用する方法

(4-14)式で表わされる目的関数に定数 a_k を代入して展用すと、

$$L = \sum_{k=1}^K r_k (G_{ok} + g_k)^2 \\ = \sum_{k=1}^K r_k (G_{ok} + a_k)(G_{ok} - a_k) + 2 \sum_{k=1}^K r_k (G_{ok} + a_k)g_k + \sum_{k=1}^K r_k (g_k - a_k)^2 \dots \dots \dots (4-29)$$

が得られる。この式の第一項は定数項、第二項は g_k の

一次式、第三項は g_k の二次式である。ここで第三項が省略できれば、目的関数を線形化することができる。このためには、 $g_k \doteq a_k$ の条件が成立するような a_k を選ばなければならない。いま第三項を無視し、目的関数を

$$L \doteq \sum_{k=1}^K r_k (G_{ok} + a_k)(G_{ok} - a_k) + 2 \sum_{k=1}^K r_k (G_{ok} + a_k) g_k \quad \dots\dots\dots (4-30)$$

で表わし、 LP 計算を比較的短時間で行なうことが出来るならば最初 $a_k=0$ とし、この結果得られた g_k の値を次の繰返し計算で使用する a_k の値とする。したがって、 j 回目の繰返し計算に使用する a_k の値を a_k^j とすれば、

$$\left. \begin{aligned} a_k^j &= g_k^{j-1} \\ \text{ただし、} a_k^1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4-31)$$

となる。このようにして、 LP 的手法を適用すれば、電圧無効電力制御の計算法としてこの方法を使用することができる。

(4.5.3) 整定条件を満足する解を求めた後で目的関数を考慮する方法

この方法は目的関数を考慮しない場合と同様の方法で整定条件を満足する解を求め、その後で目的関数を考慮する方法である。整定条件を満足する解を求めた後で目的関数を考慮する計算法としては、次の二つ

の方法が考えられる。

- (i) 整定条件を満足する範囲内で、送電損失を減少するように制御変数を逐次制御する方法
- (ii) 送電損失の減少に最も効果のある制御変数即ち、 $\partial L(x_j)/\partial x_j$ の絶対値が最大になるような制御変数 x_j も調整し、その結果整定条件を逸脱した場合は他の制御変数の調整により整定条件を満足させ、繰返し計算を行ない送電損失を減少させる方法。

後者の方法を採用する場合、各計算ステップで整定条件を逸脱した値を他の制御変数の調整により容易に調整できるようにするため、制御変数の調整は単位量とする。前者の方法は、整定条件の制限が後者に比べてきびしいため、整定条件を満足した後での送電損失の減少はさほど期待できない。これに対し後者の方法は各計算ステップで整定条件からの逸脱を一応許して計算を進めているので、かなりの送電損失の減少が期待できる。

(4.6) モデル系統による各種計算法の試算例

(4.6.1) モデル系統と諸条件

これまでに述べた各種計算法について試算するに当り、著者は第3.12図に示した小規模な系統をモデル系統として使用することにした。この系統の系統特性定数、制御変数の制限値および無効電力潮流の初期値などを第4.1表に示し、計算ケースを第4.2表に示す。

第4.1表 モデル系統の系統特性定数と諸条件

系 統 特 性 定 数 (整定条件式)	$[a_{ij}] = \begin{pmatrix} 0.457 & -0.407 & -0.093 & 0.550 & 0.200 & 0.300 \\ 0.162 & 0.211 & -0.033 & 0.200 & 0.380 & 0.110 \\ 0.362 & -0.322 & 0.719 & 0.430 & 0.160 & 0.900 \\ 0.369 & 0.278 & 0.097 & -0.375 & -0.131 & -0.313 \end{pmatrix}$					
系 統 特 性 定 数 (目的関数)	$[a_{kj}] = \begin{pmatrix} 0.339 & 0.440 & -0.106 & 0.406 & -0.208 & 0.338 \\ 0.113 & -0.100 & 0.225 & 0.136 & 0.048 & -0.719 \\ 0.452 & 0.339 & 0.119 & -0.458 & -0.160 & -0.381 \\ 0.339 & 0.440 & -0.106 & 0.406 & 0.792 & 0.338 \end{pmatrix}$					
r_k ; 送電線の抵抗値(Ω) G_{ok} ; 無効電力潮流の初期値	$[r_k] = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.44 \\ 0.45 \\ 0.32 \\ 0.31 \end{pmatrix} \quad [G_{ok}] = \begin{pmatrix} G_{o1} \\ G_{o2} \\ G_{o3} \\ G_{o4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.0 \\ 5.0 \\ 5.0 \\ -10.0 \end{pmatrix} \quad \text{※}$					
調整設備の上下限值	$[\bar{X}_j] = \begin{pmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \\ \bar{X}_3 \\ \bar{X}_4 \\ \bar{X}_5 \\ \bar{X}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 5 \\ 5 \\ 4 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} \quad [\underline{X}_j] = \begin{pmatrix} \underline{X}_1 \\ \underline{X}_2 \\ \underline{X}_3 \\ \underline{X}_4 \\ \underline{X}_5 \\ \underline{X}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5 \\ -5 \\ -5 \\ -4 \\ -2 \\ -2 \end{pmatrix}$					

※ 10MVA Base の単位法による値

第4.2表 計算 ケース

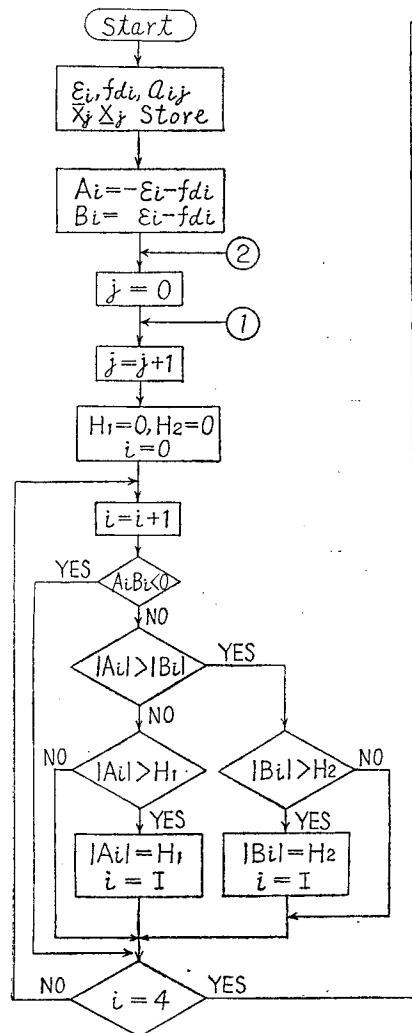
計 算 ケース NO	外 乱 条 件				整定条件を充 す解の 組合数
	f_{d1}	f_{d2}	f_{d3}	f_{d4}	
NO-1	+3.0	0	0	0	3,624
NO-2	0	3.0	0	0	275
NO-3	+0.25	+1.525	-1.45	-0.125	2,593

(4.6.2) 目的関数を考慮しない場合

(i) 繰返し座標変換法

繰返し座標変換法については(4.4.1)節で述べたように、制御変数 x_j の計算順序を $j=1, 2, 3 \sim 6$ の順で計算する場合のフローチャートを第4.2図に示す。このフローチャートによる計算例は附録に示す。

(ii) 判定関数を使用する方法



第4.2図 フローチャート I (繰返し座標変換法)

判定関数を使用する方法を大別すると、繰返し計算法と多元連立方程式による方法とに分けられる。しかし、ここで試算するモデル系統の制御変数は負荷時電圧調整器と静止形の調相設備のみであるから、多元連立一次方程式として解く方法は適切でない。したがって、ここでは判定関数を使用した繰返し計算法の試算例について述べることにする。この繰返し計算法のなかにも、次の三種類の方法がある。

(a) 制御変数の計算順序を指定する方法

(b) 制御変数の計算順序を $\partial E(x_j)/\partial x_j$ の値によって決める方法

(c) 判定関数に収束係数を使用する方法

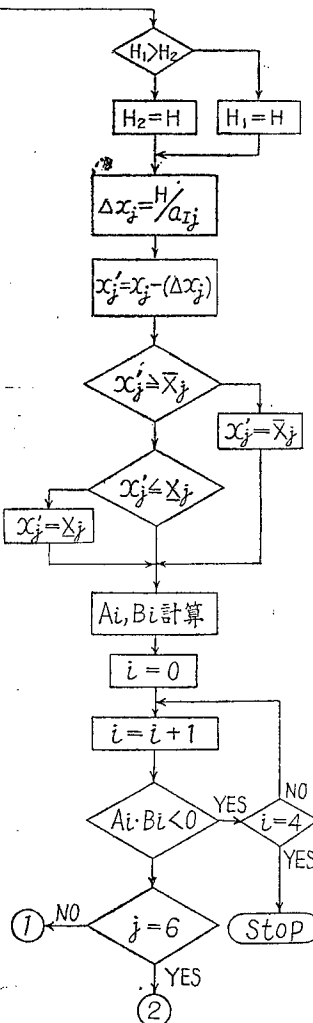
制御変数の計算順序を指定した場合のフローチャートを第4.2図に示し、 $\partial E(x_j)/\partial x_j$ の値によって制御

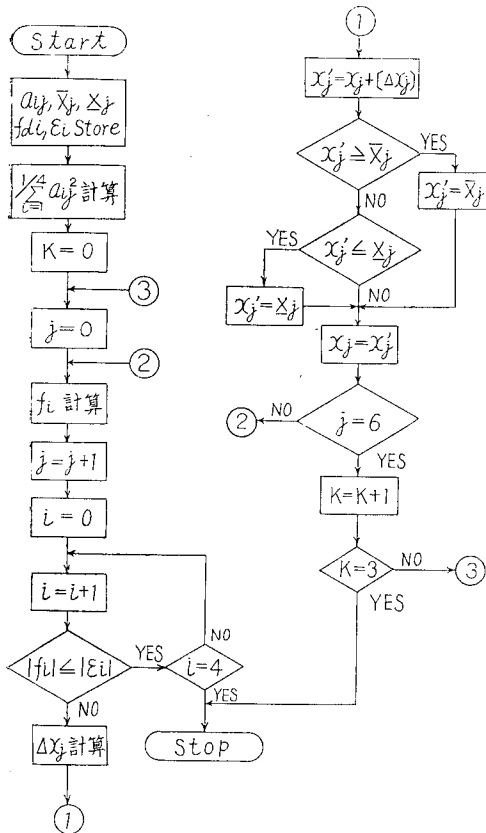
変数の計算順序を決める場合のフローチャートを第4.3図に示す。このフローチャートを使用し、第4.2表に示した計算ケースNo.2の試算例を第4.3図に示す。これと同じ条件で収束係数 k_i に f_i の絶対値を使用した場合の試算例を第4.5図に示す。

これらの試算例から解るように、収束係数のとり方により整定条件を満足する解を求めるまでの計算回数を減少することができ、(4.4.2)節の理論を裏付けるものである。

(4.6.3) 目的関数を考慮した場合

目的関数を考慮して、この問題を解く方法には、判定関数を使用する方法、およびLP的手法のあることは前節で述べた。ここで各種の計算方法についての試算例を示す前に、第4.2表に示した各計算ケースのうち、整定条件を満足する解の組合せ数および送電損失を明らかにすることができれば、各種計算法の計算過程を知るためには極めて有





第4.3図 フローチャートII
(判定関数を使用する方法)

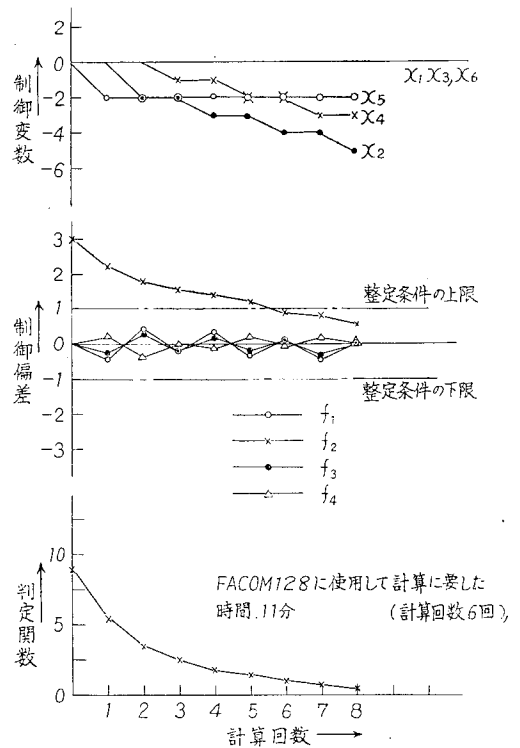
- (i) x_j の計算順序, $j=1, 2, 3, \dots$ の順
- (ii) Δx_j の計算は, $\partial E(x_j)/\partial x_j = 0$
- (iii) f_i が整定条件を満足しなくとも繰返18回でSTOP

用である。

このため筆者は第4.6図のフローチャートによって整定条件を満足する制御変数の組合せ数を FACOM-222 によって計算した結果次の結果を得た。この結果、各計算ケースで整定条件を満足する解の組合せ数に相当の差があることが解る。このうち計算ケースNo.2の場合は整定条件を満足する解の組合せ数が少ないので、附録2に解の総ての組合せを示す。また制御変数の整定条件を満足する解の存在範囲と送電損失の関係を第4.7～4.9図に示す。この図は各送電損失階級で各制御変数の分布の最大値を100パーセントにとって分布を示したものである。

(i) 目的関数を含んだ判定関数を使用する方法

この方法は目的関数を考慮しない場合の判定関数に目的関数を加えたものを新しい判定関数にする方法で、その判定関数は(4-27)式で表わされる。いま、(4.5.1)の理論より収束係数 k_i, k_e を単位量にとり、



第4.4図 試算例1

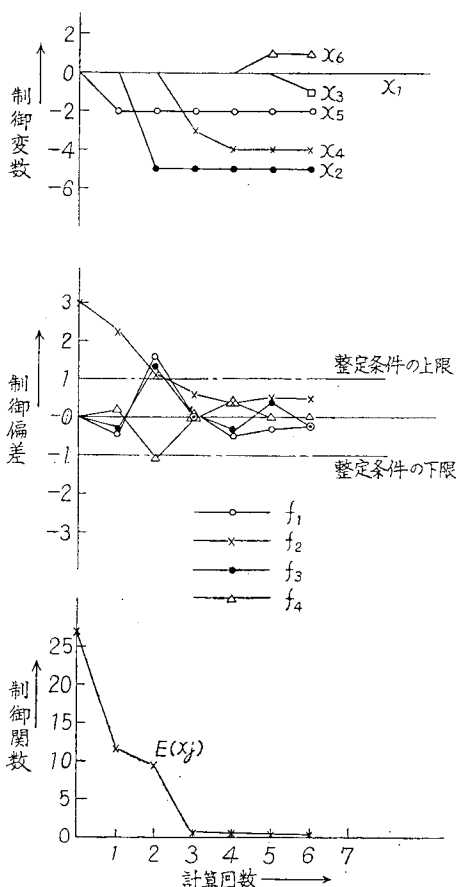
- (i) 判定関数の収束係数 $k_i=1$
- (ii) 制御変数の計算順序 $\partial E(x_j)/\partial x_j$ の絶対値
- (iii) 計算ケース, No.2, (第4.2表case-2)

整定条件を満足する毎に目的関数の Weight を増すという方法により計算する場合のフローチャートを第4.10図に示し、試算結果を第4.11～4.13図に示す。各計算ケースで、整定条件を満足する制御変数の組合せのなかで送電損失は第4.4表の範囲にあり、ほぼ満足できる範囲に収斂していることが解る。

目的関数を含んだ判定関数を使用する場合制御変数を常に単位量だけ調整する方法が最も確実な方法であることは(4.5.1)節で述べた通りであるが、試算例もこれを裏付け、制御変数の操作量 Δx_j を $\partial E(x_j)/\partial x_j = 0$ によって求めた場合には、ハンチング現象を起した場合もある。このようなハンチング現象を起した場合の計算例は附録に示したが、この計算法で問題になる点は計算を停止するための条件であり、更に検討が必要である。

(ii) LP的手法による方法

LPを使用して計算する場合には、最初に整定条件の絶対値をとり、かつ非負条件とすることが必要である。また同時に制御変数の制限条件も満足するように



第4.5図 計算例-2

- (i) 判定関数, $k_i = |f_i|$
- (ii) 制御変数の計算順序 $\partial E(x_j)/\partial x_j$ の絶対値
- (iii) 計算ケース, No.2 (第4.2表 case-2)

座標変換し目的関数を線形化することが必要である。このような準備をした上で、計算すべきフローチャートを第4.14図に示す。このフローチャートを使用して計算した結果を第4.5表に示す。この結果から、LP的手法によって求めた制御変数を整数化した解の中に最適解が含まれていることが解る。この表に示した結果は第1回目の近似計算によって得られたものであり、試算例ではいずれの場合も送電損失最小の解が得られている。第2回目の近似計算では、いずれの場合も送電損失が非常に大きくなり、第3回目の近似計算で第1回の結果に戻り、以下同じ状態を繰返している。したがって本方法を使用する場合、LP計算は一回にとどめ、その結果の近傍で整定条件を満足する解のなかで、送電損失が最小になる解の組合せを求めれば充分であると考えられる。しかし系統条件が変わった場合には更に検討を加え、適当な繰返し計算回数を決めるこ

とが必要である。なほ参考までに示すと、筆者の試算したモデル系統の場合1回のLP計算に要した計算時間はFACOM-128で約1時間であった。

第4.3表 計算ケースと解の組合数

計算ケース No.	整定条件を満足する制御変数の組合数	全組合数を求めるための所要計算時間
No.1	3,624 (組)	75 (分)
No.2	275 (〃)	42 (〃)
No.3	2,593 (〃)	57 (〃)

- (注) (1) FACOM-222は国産の中型計算機であり他の計算に使用したFACOM-128に比べると極めて高速であり、計算時間はFACOM-128の約1/100である。
 (2) 計算時間にはPRINT時間も含む

第4.4表 整定条件を満足する送電損失の範囲と計算結果

計算ケース No.	整定条件を満足する制御変数のLoss範囲	目的関数を含んだ判定関数で求めたLoss
No.1	29 ~ 85	31.4
No.2	69.8 ~ 110	76.6
No.3	48.3 ~ 105	54.8

第4.5表 LPによる計算結果と整数解

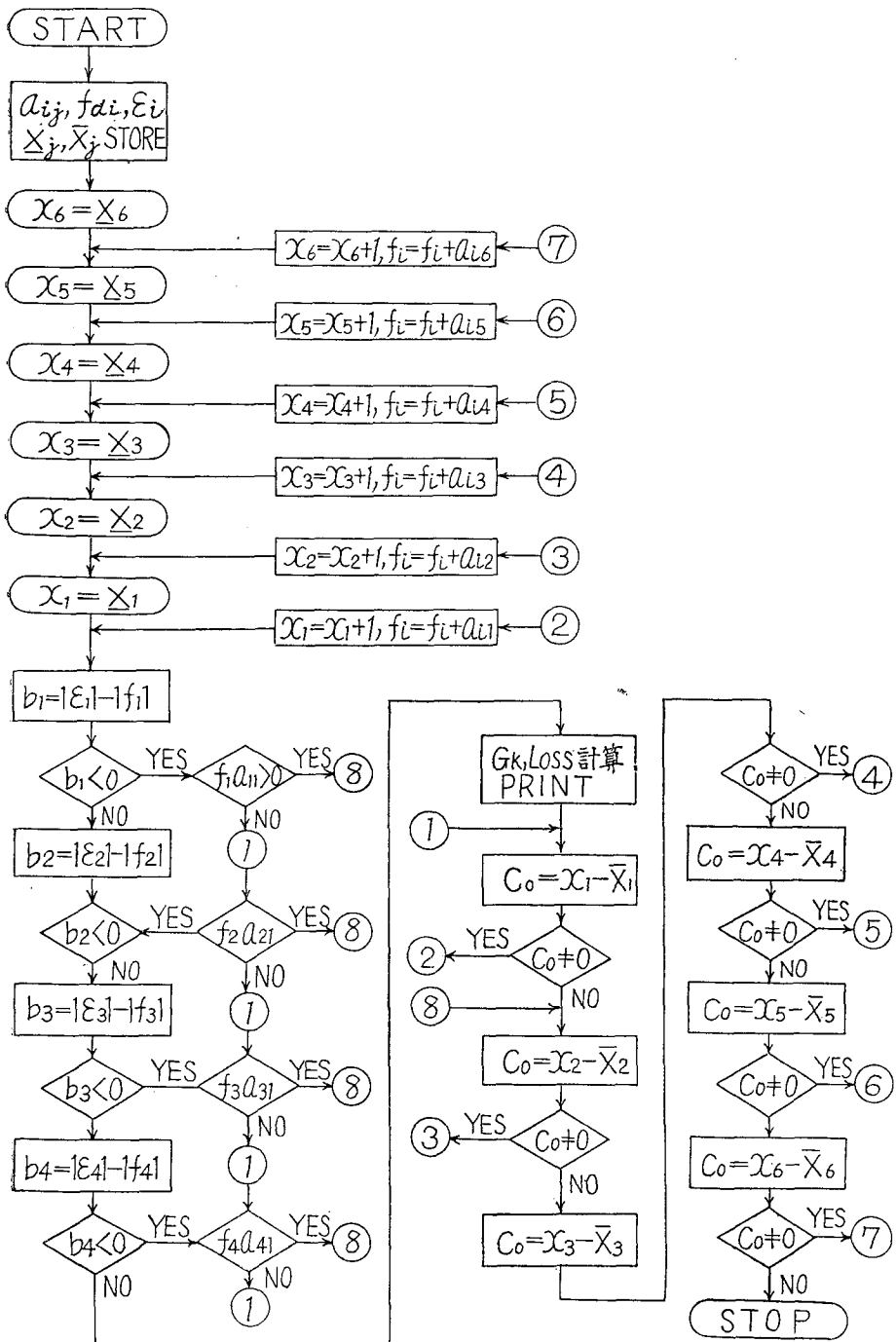
計算ケース No.1			計算ケース No.3		
計算結果	解の前後の整数解	最適解	計算結果	解の前後の整数解	最適解
$x_1 = -3.14$	-3, -4	-4	$x_1 = -0.15$	0, -1	0
$x_2 = 2.2$	+2, +3	+3	$x_2 = -4.31$	-4, -5	-4
$x_3 = -0.96$	0, -1	0	$x_3 = -1.89$	-1, -2	-1
$x_4 = -1.75$	-1, -2	-2	$x_4 = -4.0$	-4	-4
$x_5 = 3.0$	+3	+3	$x_5 = 2.43$	+2, +3	+2
$x_6 = 2.0$	+2	+2	$x_6 = 2.0$	+2	+2

- (iii) 整定条件を満足する解を求めた後で目的関数を考慮する方法

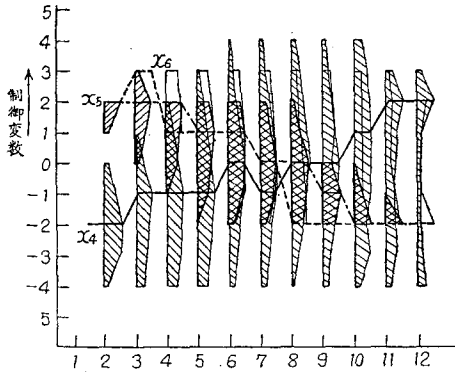
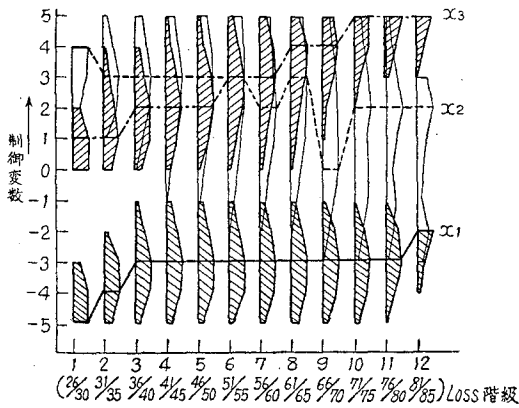
この方法は目的関数を考慮しない場合と同様の方法で、整定条件を満足する解を求め、その後で目的関数を考慮する方法である。目的関数を考慮する場合、次の(a), (b)の二つの方法があることは前述の通りである。

- (a) 整定条件を満足している範囲内で、送電損失を減少するように制御変数を逐次制御する方法
- (b) 送電損失の減少に最も効果のある制御変数を $\partial L(x_j)/\partial x_j$ の値によって求め、その制御変数を調整した結果整定条件を逸脱した場合には、他の制御変数により整定条件を満足させながら繰返し計算を行なう方法

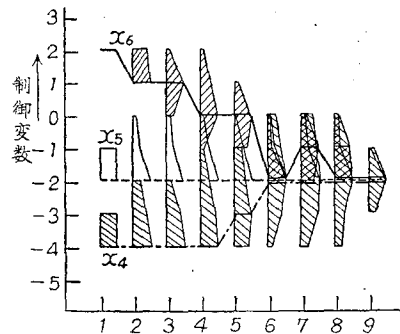
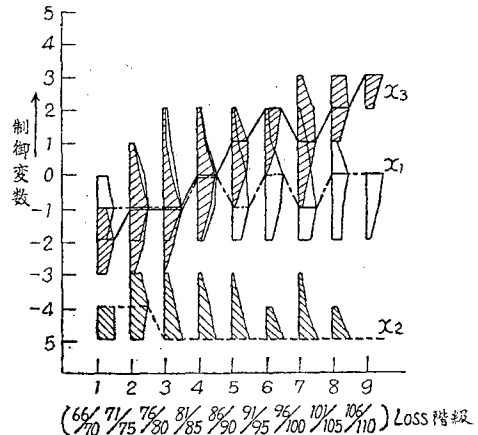
ここでは後者の方法をモデル系統に使用した場合の



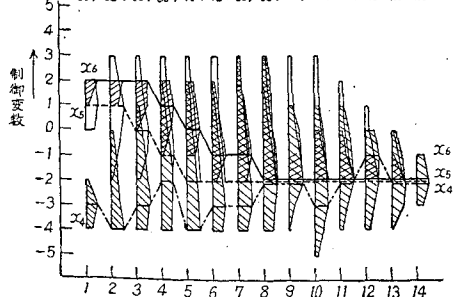
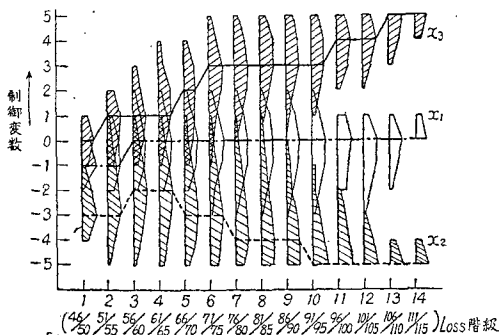
第 4.6 図 フローチャートⅢ (整定条件を満足する解を総て求める場合)



第4.7図 整定条件を満足する制御変数の存在範囲と送電損失 (計算ケース, 第4.2表 case-1)



第4.8図 整定条件を満足する制御変数の存在範囲と送電損失 (計算ケース, 第4.2表 case-2)



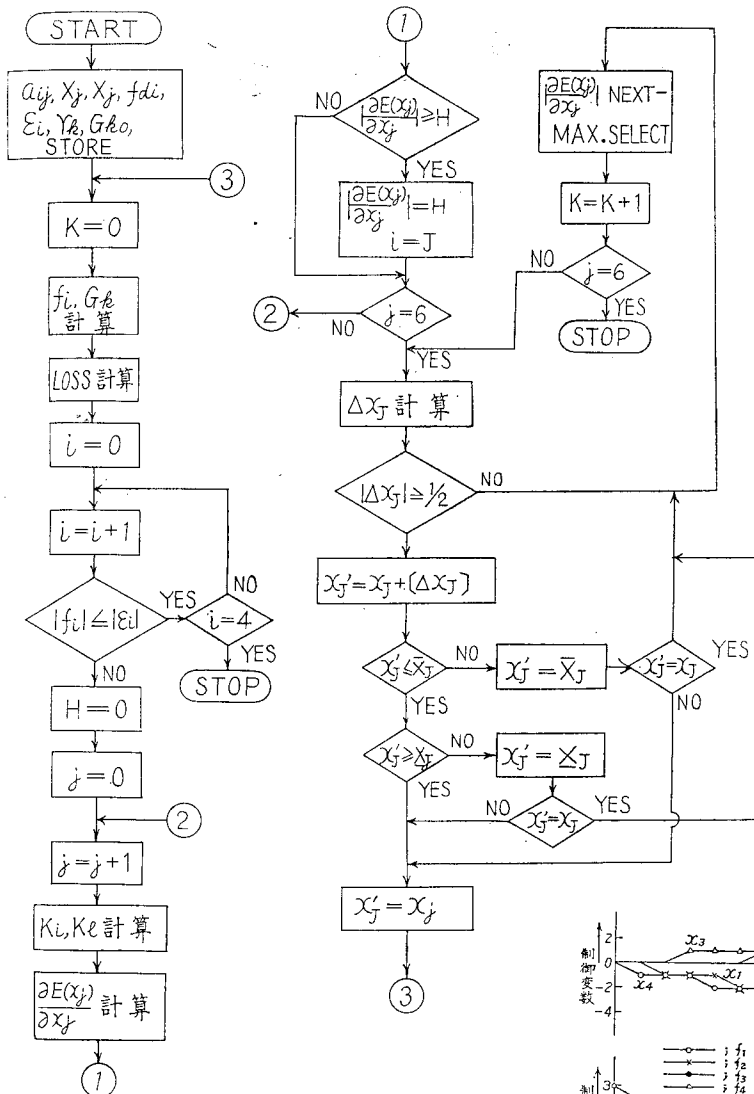
第4.9図 整定条件を満足する制御変数の存在範囲と送電損失 (計算ケース, 第4.2表 case-3)

試算例について述べる。この方法をフローチャートに示せば第4.15図のようになり、整定条件を満足する制御変数の組合せを求めるまでの計算には判定関数を使用し、モデル系統で試算した結果を第4.16図および第4.17図に示す。

この計算にもFACOM-128を使用した。整定条件を満足する解を求める計算も含めて、全繰返し計算回数は7～13回で、平均10回程度であった。従って1回の繰返し計算時間は3分程度であるから、各計算ケースとも全計算時間は平均30分程度であった。

(4.7) 各計算法の比較

判定関数に目的関数を含めて計算する方法は、判定関数最小の条件が必ずしも送電損失最小の条件と一致しないところに問題がある。しかし試算例から解るように、収束係数を適切に選ぶことにより、ほぼ満足すべき結果が得られている。したがって整定条件を満足したときに判定関数を目的関数の項だけにするなどの考慮を払えば、さらにより結果が期待できるものと考えられる。



第4.10図 フローチャートIV

(目的関数を含んだ判定関数を使用する場合)

LP 手法によって計算する方法には、二次の目的関数を線形近似し計算を進めるところに問題がある。試算したモデル系統の場合には、第1回の近似で、ほとんど最適解に近い解が得られている。計算時間も判定関数と目的関数を加えた場合よりも多少長い程度であり、系統によってはこの方法が適している場合も考えられる。

最初目的関数を考慮せず、整定条件を満足する解を求めた後で目的関数を考慮する方法は、判定関数に目的関数を加える方法よりも、収束係数の選択が容易であるばかりでなく、計算の取扱も極めて容易である。また他の方法に比べて計算時間が短かく系統規模が大

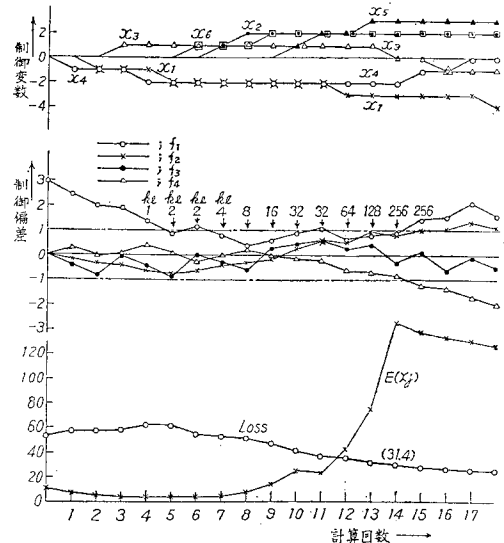
きくなくても計算時間がそれ程長くないという利点がある。また常に整定条件を満足した後で目的関数を考慮するという確実な点を考えれば、この計算方法が、電圧無効電力制御の実用的計算方法として最も適した方法であるといえる。

第5章 結 論

本論文は、筆者の経験した試験研究ならびに電子計算機による解析的研究をもとにし、電力系統の電圧無効電力制御について述べたものであるが、その重点は電圧無効電力の計算機制御を実施する場合の計算方法におかれている。

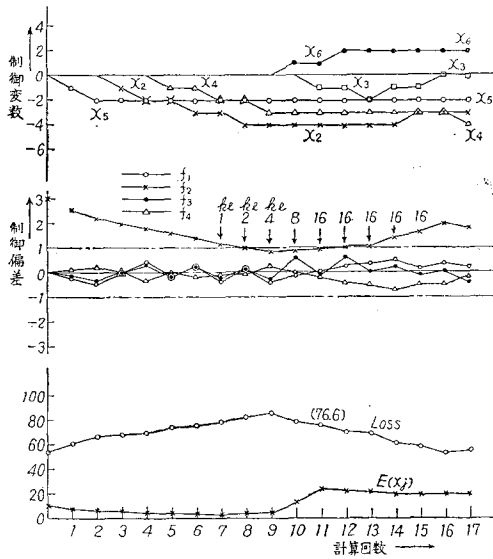
以下これまでに得られた結論を要約して示せば、次の通りである。

- (1) 一次変電所の電圧変動の大きい時間は長周期(1時間以上)、短周期



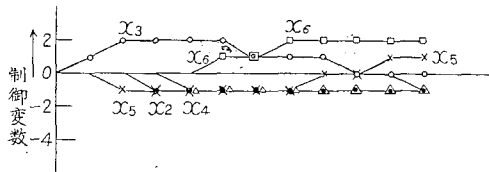
第4.11図 計算例—3

- (i) 計算条件 第4.2表 case—1
- (ii) 目的関数を含んだ判定関数使用
- (iii) 送電損失は図中の値を10倍したものが KVA 単位となる



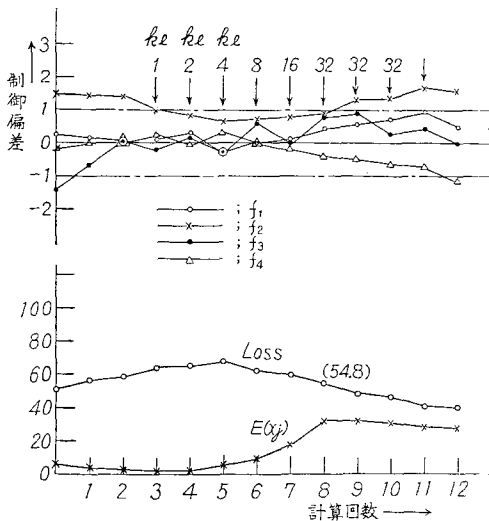
第4.12図 計算例—4

- (i) 計算条件 第4.2表 case—2
(ii) 目的関数を含んだ判定関数を使用



第4.13図 計算例—5

- (i) 計算条件 第4.2表 case—3
(ii) 目的関数を含んだ判定関数を使用

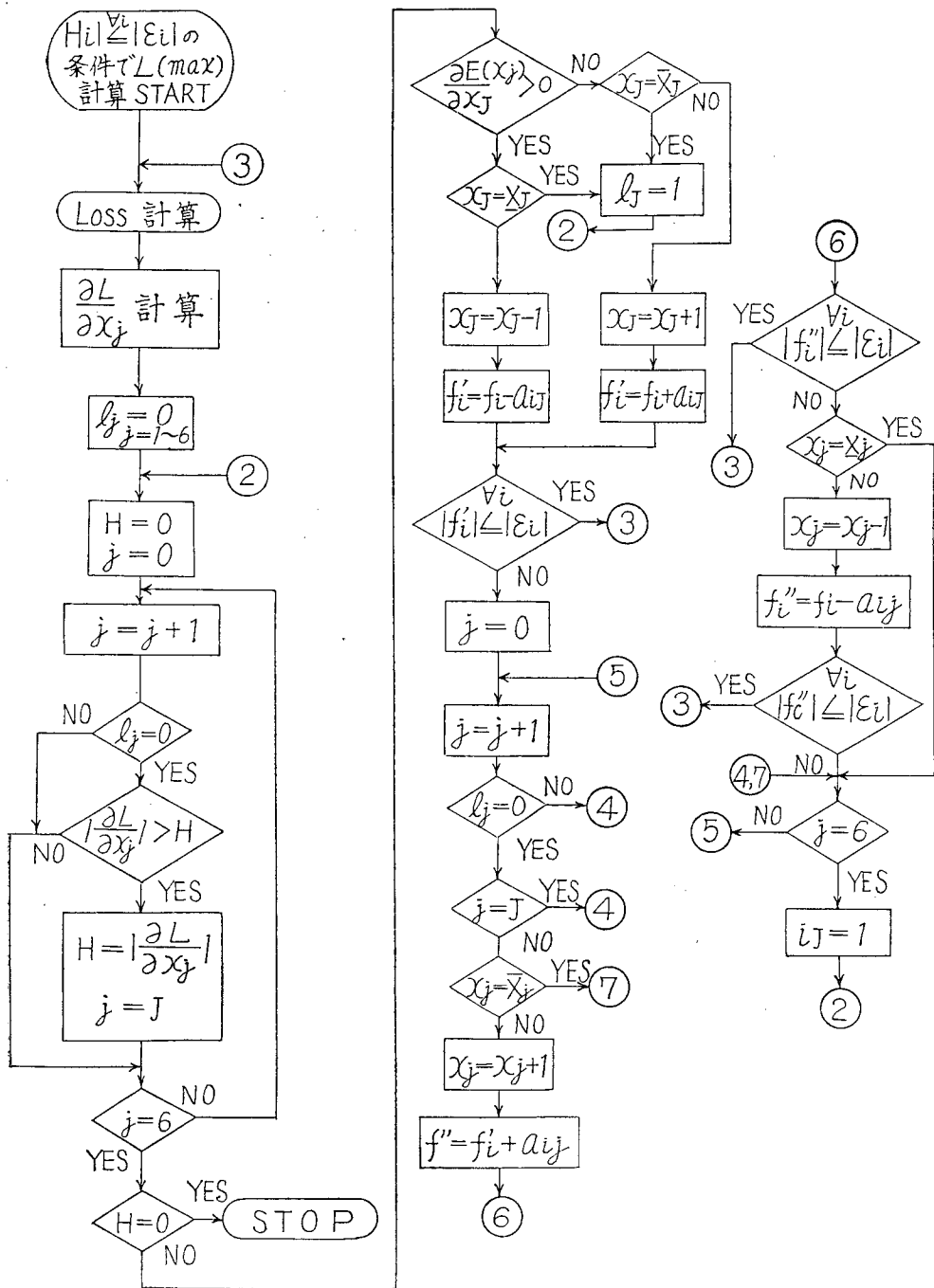


第4.14図 フローチャートV
LP手法を使用する方法

期とも朝昼点灯時の負荷変動のはげしい時間帯であり、発電所で運転目標電圧を変更する時間帯でもある。また短周期の電圧変動を時間帯別にみると、朝昼点灯時には0.5～0.7パーセントになるが、それ以外の時間帯では0.2～0.3パーセント程度であり、日間では0.3パーセントであった。したがって朝昼点灯時の負荷変動の激しい時間帯に着目して電圧調整を行えば電圧変動を相当少なくすることができる。

(ii) 一次変電所の短周期変動成分のスペクトル密度には、 $S(f)=kT^2$ というように、変動周期の2乗に比例するという関係が認められた。これは負荷周波数自動制御の研究で、周波数変動のスペクトル密度が変動周期の2乗に比例するという結果と類似であり興味ある結果である。

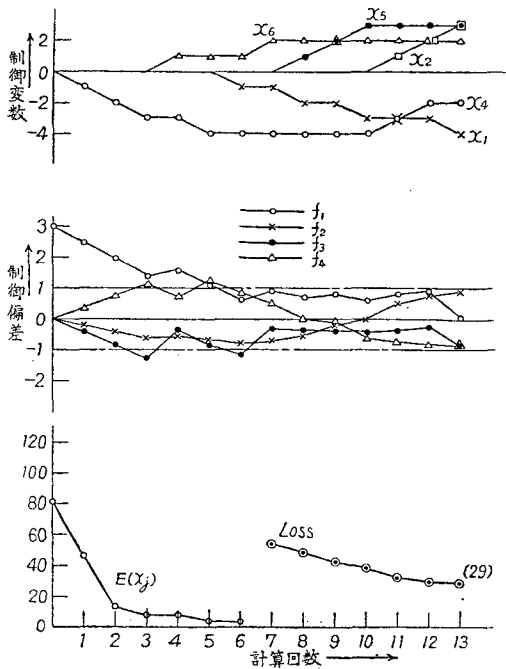
(iii) 配電用変電所の電圧変動は長周期および短周期成分とも、一次変電所の場合と同様、朝昼点灯時の負荷変動の大きい時間帯に、大きい電圧変動



第 4.15 図 フローチャート VI
(整定条件を満足した後で目的関数を考慮する方法)

の生ずることが明らかになった。短周期変動成分の標準偏差をみると、一次変電所のほぼ 2 倍の値を示し、負荷変動の激しい時間帯では配電用変電

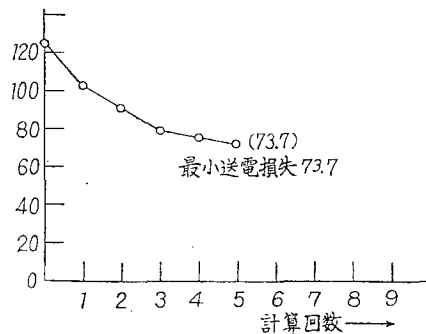
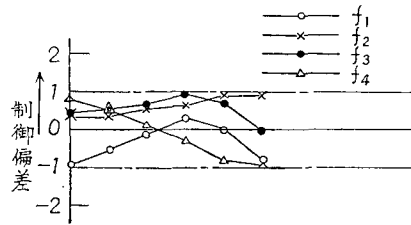
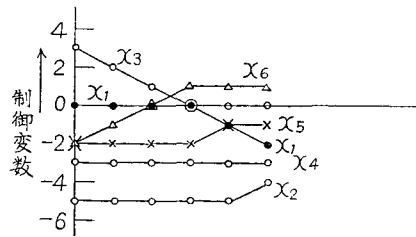
所の電圧変動が多少大きい程度であるのに対し、それ以外の時間帯では 2～3 倍の値を示している。同時に測定した負荷時電圧調整器の動作回数を



第4.16図 計算例—6
計算ケース (第4.2表 case—1)

みると、日間の動作回数的大半は朝昼点灯時の負荷変動の激しい時間帯即ち、上位系統で運転目標電圧を変更する時間に動作しており、上位系統の運転目標電圧の変更が、系統の電圧変動の一因となっている。このことは短周期の標準偏差からも明らかであり、電圧無効電力制御を実施する場合、送電系統と配電系統で適切な協調が必要であることを示すものである。

- (iv) 配電用変電所の短周期成分のスペクトル密度には、一次変電所の場合のように、 $S(f)=kT^2$ という様な関係は認められなかったが、15分以上の変動成分についてみるとほぼ変動周期の2乗に比例していると思倣することができる。
- (v) 配電用変電所の電圧無効電力変動を実測する測定対象として、需用構成、供給地域などから代表的変電所を選択したが、その変動特性に有意的な差は認められなかった。
- (vi) 電圧変動の分布は、一次変電所、配電用変電所とも運転目標電圧の近傍で正規分布を示した。
- (vii) (i)~(vi)の結果は、東京電力の系統を対象にした実測の結果得られたものであり、この結果が総て他の電力会社の場合にも適用できるとは考えられないが、一次変電所の電圧変動が配電用変電所のほぼ $\frac{1}{2}$ であることや、その変動の分布が正



第4.17図 計算例—7
(i) 計算ケース, 第4.2表 case—2
(ii) $|f_i| \leq \epsilon_i$ で Max. Loss より計算開始

- 規分布をなすことなど、他の電力会社の系統で実測しても同様の結果が得られるものと考えられる。
- (viii) 電力系統の問題を取扱う場合、送電線を集中定数回路 (π 回路) として取扱った場合の誤差が1パーセントまで許容されるならば、送電線は総て集中定数回路として取扱ってよいことを示した。また2機系統の場合変分を使用して、電圧と無効電力の関係式を求め、系統特性定数を定義した。この定数は、実際の給電運用上も、電圧無効電力制御の面からも極めて有用であることを明らかにした。
- (ix) 系統特性定数のなかには系統の電圧調相設備および送電線路の電力潮流が含まれるが、実際の送電系統では電力潮流の成分を省略しても、その誤差が比較的少ないことを明らかにし、近似式を導入して、電圧無効電力制御の関係式を簡単な形で表現することができた。
- (x) 電圧無効電力制御の関係式として得られた (viii), (ix) の結果は、多機系統の場合にも適用で

きることを明らかにした。

- (xi) 系統特性定数を使用し、電圧無効電力制御の基本方程式を誘導した。この基本方程式は絶対値付連立不等式で表わされ、その制御変数のなかには、負荷時電圧調整器、調相設備のように常に整数解を必要とするものがあることや、連立不等式の数と制御変数の数が一致しないこと、および目的関数が一次式でない場合のあることを示した。
- (xii) 電圧無効電力制御の基本式は、前述のような特異性を有し、これまでに開発されている手法で、この問題を解くことは極めて困難であった。そこで筆者は、制御偏差と制御量の許容変動量との関数として表わされる判定関数を定義し、各種の解法を開発することができた。即ち、目的関数を考慮しない場合に電圧および無効電力の変動を許容変動範囲に調整する場合には、次に示す(a)、(b)の二方法を、目的関数を考慮する場合には、特に目的関数が二次式になる場合を考慮し、次に示す(c)(d)(e)の三種類の解法を開発した。
 - (a) 繰返し座標変換法
 - (b) 判定関数を使用する解法
 - (c) 整定条件を満足する解を求めた後で目的関数を考慮する方法
 - (d) 目的関数を含んだ判定関数を使用する方法
 - (e) LP的手法による解法

- (xiii) 電圧無効電力の計算機制御のために開発した計算方法をモデル系統に適用し、試算した結果、次の点が明らかになった。目的関数を考慮しない場合には判定関数を使用し、調整すべき制御変数を $\partial E(x_j)/\partial x_j$ の値によって決める方法がよく、目的関数を考慮する場合には、最初目的関数を見捨て整定条件を満足する解を求めた後で、 $\partial L(x_j)/\partial x_j$ の値によって目的関数の減少を計る方法が実用的である。この結果整定条件を満足しない場合には他の制御変数によって整定条件を満足させるという計算方法が電圧無効電力制御の計算法として最も実用的な計算法であることを明らかにした。

以上が電圧無効電力の計算機制御の研究として、これまでに得られた結果をとりまとめたものであるが、序論にも述べた如く、このような電圧無効電力の制御方式は、未だかつて採用例を見ないものであり、その実施に当っては多くの解決しなければならない問題が残されている。二三列記すれば、

- (i) 系統特性定数、特に各電気所相互間の系統特性定数の値、計算機的能力から決まる1グループ

の適正規模の決定

- (ii) 合理的系統運用、サービスコオリオティの確保などから決まる各電気所の運転目標値と許容変動量の決定
- (iii) 制御効果および経済性などから決まる負荷時電圧調整器の設置点および適正タップ巾とタップ数の決定（この問題の解法については附録4に示した）。
- (iv) 各電気所に設置する調相設備の適正容量と1バンク容量の決定
- (v) 本制御方式と発電所の協調制御方式のあり方
- (vi) 系統電圧の変動特性、計算機の計算能力などから決まるサンプリング時間の決定。

この他にも具体的な実施段階になると、なほ種々の問題が発生するであろうが、系統運用のために導入される計数型電子計算機を、適当な時間この制御に使用するとか、専用の計数型電子計算機を使用した制御方式に近い将来必ず実施されるであろうことを期待し、この研究が、この分野の仕事にたずさわる関係各位に、その第一石として役立つならば筆者のこの上ない喜びである。

最後に本研究に際しては、明治大学神保成吉教授の終始絶大なる御指導を賜り、多大の御援助と御指導を戴いた電力中央研究所電力第部部当任工学博士上之園親佐氏(現京都大学教授)、電力回路研究室室長神宮司武雄氏、電力系統研究室長工学博士梅津照裕氏(現電力第2部部長)、同研究室主査研究員工学博士尾出和也氏(現電力系統研究室室長)、の各位に深く感謝の意を表します。

また電圧無効電力変動の実測ならびに解析に御協力戴いた電力系統研究室研究担当小宮康雄氏、同研究室研究担当都築旋二氏、同研究室増茂勇氏、同研究室金子隆一氏および同研究室吉田幸雄氏に深く感謝の意を表する次第である。

デジタル計算機の使用に当っては、早稲田大学田村康男教授、富士通ファコム計算センタ鈴木滋氏および同所の山下真一郎氏の絶大なる御協力を得、電圧無効電力変動および系統特性定数の実測や解析には、中部電力株式会社蛙川達雄氏、千葉明磨氏、竹安一郎氏、東京電力株式会社三井恒夫氏、石橋昌彦氏、横山亨司氏、大塚脩一郎氏、鈴木健司氏の御協力を戴き初期の目的を達することができた。この他各電力会社の数多くの方々の御協力を得たことを述べ厚くお礼申し上げる次第である。

附録1 繰返し座標変換法による試算例

第4.2表に示した計算ケースNo.1に繰返し座標変換法を適用した場合の計算例を示す。本文で述べた(4-11)式の整定条件

$abs.[-\varepsilon_i] \leq abs.([f_{di}] + [a_{ij}][x_i]) \leq abs.[\varepsilon_i]$ を次のように表わす。

$$\left. \begin{array}{l} [-\varepsilon_i] \leq [f_i] \leq [\varepsilon_i] \\ [f_i] = [f_{di}] + [a_{ij}][x_j] \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-1)$$

この式に、計算ケースNo.1の条件として与へられた系統特性定数、外乱条件および許容変動範囲 $[a_{ij}]$, $[f_{di}]$, $[\varepsilon_i]$ を代入すれば、

$$\left. \begin{array}{l} -1 \leq f_1 \leq 1 \\ -1 \leq f_2 \leq 1 \\ -1 \leq f_3 \leq 1 \\ -1 \leq f_4 \leq 1 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-2)$$

ただし

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.457 & -0.407 & -0.093 \\ 0.162 & 0.211 & -0.033 \\ 0.362 & -0.322 & 0.719 \\ 0.369 & 0.278 & 0.097 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix}$$

となる。ここで本文で説明したように定数項を移項すれば(附1-2)式は次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} -4 \leq f_1 \leq -2 \\ -1 \leq f_2 \leq 1 \\ -1 \leq f_3 \leq 1 \\ -1 \leq f_4 \leq 1 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-3)$$

求める制御変数の計算順序を $j=1, 2, 3, \dots$ とすると、 f_1 の両辺が正負の値で囲まれるためには、(附1-2)、(附1-3)式により、

$$\left. \begin{array}{l} x_1 \leq -2/0.457 \approx -4.38 \\ x_2 \sim x_6 = 0 \\ \Delta_1 x_1 = -5 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-4)$$

となる。ここで $x_1 \leq -4.38$ より $\Delta_1 x_1$ を -5 にした理由は、 x_1 の値が -4.38 よりも小さい時に、附1-3の f_1 が正負の値で囲まれる。しかも、このモデル系統で制御変数のとり得る値は整数に限られているから $\Delta_1 x_1 = -5$ となる。($\Delta_1 x_1$; Δ の Suffix は繰返座標変換数を示す)。

(附1-4)式で求めた $\Delta_1 x_1 = -5$ を代入すると、

$$\left. \begin{array}{l} -1.715 \leq f_1^1 \leq 0.285 \\ -0.19 \leq f_2^1 \leq 1.81 \\ 0.81 \leq f_3^1 \leq 2.81 \\ 0.845 \leq f_4^1 \leq 2.845 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-5)$$

となる。この式より、次に座標変換すべき x_2 の値は、(附1-5)式の f_1^1 より、

$$\left. \begin{array}{l} x_2 \geq 0.845/0.2775 \approx 3.04 \\ \Delta_1 x_2 = 4 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-6)$$

$$\left. \begin{array}{l} -0.087 \leq f_1^2 \leq 1.913 \\ -1.034 \leq f_2^2 \leq 0.966 \\ 2.098 \leq f_3^2 \leq 4.098 \\ -0.265 \leq f_4^2 \leq 1.735 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-7)$$

この式より、次に座標変換すべき x_3 の値は、(附1-7)式の f_3^2 より

$$\left. \begin{array}{l} x_3 \leq 2.098/0.719 \approx 2.92 \\ \Delta_1 x_3 = 3 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-8)$$

$$\left. \begin{array}{l} 0.202 \leq f_1^3 \leq 2.202 \\ -0.935 \leq f_2^3 \leq 1.065 \\ -0.659 \leq f_3^3 \leq 1.341 \\ -0.557 \leq f_4^3 \leq 1.443 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-9)$$

ここで、次に座標変換すべき x_4 の値は、(附1-9)式より、

$$\left. \begin{array}{l} x_4 \geq 0.202/0.55 \approx 0.368 \\ \Delta_1 x_4 = 1 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-10)$$

$$\left. \begin{array}{l} -0.358 \leq f_1^4 \leq 1.642 \\ -1.135 \leq f_2^4 \leq 0.865 \\ -1.089 \leq f_3^4 \leq 0.991 \\ -0.182 \leq f_4^4 \leq 1.818 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (附1-11)$$

(附1-11)式から明らかなように $[f_i^n]$ は正負の値で囲まれていることが解る。このように、繰返し座標変換を続け、 $[f_i^n]$ が総て正負の値で囲まれたとき、 $[f_i^n] = [0]$ とおけば整定条件を満足する制御変数 x_j の組合せが求められる。したがって制御変数 x_j は

$$\begin{aligned} x_j &= \Delta_1 x_j + \Delta_2 x_j + \Delta_3 x_j + \dots \\ &= \sum_{n=1}^n \Delta_n x_j \dots\dots\dots (附1-12) \end{aligned}$$

で与えられるが、この問題では(附1-11)式で、 $[f_i^4]$ が総て、正負の値によって囲まれているから、 $[f_i^4] = [0]$ とおけば、(附1-12)式より、次の解が得られる。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5 \\ 4 \\ 3 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (附1-13)$$

参考までに、この場合の無効電力潮流による送電損失を計算すれば、

$$\begin{aligned} L(x_j) &= \sum_{k=1}^K n_k (G_{ok} + g_k)^2 = 50.1 \\ &\dots\dots\dots (附1-14) \end{aligned}$$

となる。

附録2 整定条件を満足する解と送電損失 (計算ケース 第4.2表 No.2)

Loss 階 級	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	Loss	Loss 階 級	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	Loss
66~70	-0	-5	-3	-3	-2	+2	69.8	76~80	-1	-3	-2	-3	-2	+1	79.0
	-1	-4	-2	-3	-2	+2	69.9		0	-5	-2	-3	-2	+1	77.6
	-1	-5	-2	-4	-1	+2	69.9		+1	-5	-2	-3	-2	+1	76.5
	-2	-4	-1	-4	-1	+2	69.9		0	-5	-1	-2	-2	+1	79.6
71~75	0	-5	-1	-2	-2	+1	75.5	81~85	+1	-5	-1	-3	-2	+1	78.6
	-1	-4	-1	-2	-2	+1	73.6		-2	-4	-1	-3	-2	+1	79.1
	-1	-4	0	-2	-2	+1	75.6		-1	-4	-1	-3	-2	+1	77.7
	-2	-3	0	-2	-2	+1	73.7		0	-4	-1	-3	-2	+1	76.6
	-2	-3	+1	-2	-2	+1	75.7		-1	-4	0	-3	-2	+1	79.7
	0	-4	-2	-3	-2	+1	74.7		0	-4	0	-3	-2	+1	78.7
	-1	-3	-1	-3	-2	+1	74.8		-1	-4	-1	-2	-2	0	80.2
	0	-3	-2	-4	-1	+1	74.6		-1	-3	0	-3	-2	+1	76.7
	-1	-4	-1	-4	-1	+1	74.7		-2	-5	-1	-4	-1	+1	79.8
	-1	-3	-1	-3	-1	+1	73.6		-1	-5	-1	-4	-1	+1	78.1
	-1	-5	0	-3	-1	+1	75.7		0	-5	-1	-4	-1	+1	76.7
	-2	-4	0	-3	-1	+1	73.7		-1	-5	0	-4	-1	+1	80.2
	-2	-4	+1	-3	-1	+1	75.8		0	-5	0	-4	-1	+1	78.8
	-2	-5	0	-4	0	+1	74.7		-1	-4	0	-4	-1	+1	76.8
	0	-5	-3	-4	-2	+1	74.0		-2	-5	+1	-4	0	+1	76.9
	-1	-5	-3	-4	-2	+2	72.8		-1	-5	-2	-4	-2	+2	77.2
	0	-5	-2	-4	-2	+2	75.8		-1	-5	-1	-4	-2	+2	79.1
	+1	-5	-2	-4	-2	+2	74.6		0	-5	-1	-4	-2	+2	77.7
	-1	-4	-2	-4	-2	+2	74.0		-1	-4	0	-4	-2	+2	77.8
	0	-4	-2	-4	-2	+2	72.9		0	-5	-1	-1	-2	-1	85.6
	-1	-4	-1	-4	-2	+2	75.9		-1	-4	0	-1	-2	-1	85.7
	0	-4	-1	-4	-2	+2	74.7		+1	-5	-1	-3	-2	0	85.6
	0	-5	-2	-3	-2	+2	71.6		+2	-5	-1	-3	-2	0	84.9
	-1	-4	-1	-3	-2	+2	71.6		+1	-4	-1	-3	-2	0	82.7
	-1	-3	-1	-4	-1	+2	71.7		0	-4	0	-3	-2	0	85.7
76~80	-1	-5	-1	-3	-1	0	80.5		+1	-4	0	-3	-2	0	85.0
	0	-5	-1	-3	-1	0	79.2		0	-3	+1	-3	-2	0	85.1
	-1	-5	+1	-2	-1	0	80.8		-1	-3	-1	-2	-2	0	83.5
	-2	-4	+2	-2	-1	0	80.9		0	-5	-1	-2	-2	0	82.3
	-1	-5	0	-4	0	0	80.3		-1	-5	0	-2	-2	0	85.8
	-2	-5	+1	-3	0	0	79.6		0	-5	-0	-2	-2	0	84.5
	+2	-5	-3	-4	-2	+1	78.0		+1	-5	-0	-2	-2	0	83.6
	+0	-5	-2	-4	-2	+1	80.9		-2	-4	0	-2	-2	0	83.7
	+2	-5	-2	-4	-2	+1	80.1		-1	-4	0	-2	-2	0	82.4
	+1	-4	-2	-4	-2	+1	78.1		0	-4	0	-2	-2	0	81.4
	+1	-4	-1	-4	-2	+1	80.2		-2	-4	+1	-2	-2	0	85.9
	0	-3	-1	-4	-2	+1	78.2		-1	-4	+1	-2	-2	0	84.7

Loss 階 級	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	Loss	Loss 階 級	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	Loss
81~85	0	-4	+1	-2	-2	0	83.7	86~90	-2	-4	+1	-2	-1	-1	86.2
	-1	-3	+2	-2	-2	0	83.8		-2	-5	+1	-3	0	-1	87.6
	0	-5	-1	-4	-1	0	83.8		+1	-5	+1	-4	-2	0	90.3
	+1	-5	-1	-4	-1	0	82.7		0	-4	0	-4	-2	0	90.4
	+1	-5	0	-4	-1	0	85.1		0	-5	-1	-3	-2	0	86.6
	0	-4	0	-4	-1	0	82.9		-1	-5	0	-3	-2	0	90.3
	0	-4	+1	-4	-1	0	85.2		0	-5	0	-3	-2	0	89.0
	-2	-5	0	-3	-1	0	84.4		+1	-5	0	-3	-2	0	87.9
	-1	-5	0	-3	-1	0	82.8		+2	-5	0	-3	-2	0	87.2
	0	-5	0	-3	-1	0	81.5		-1	-4	0	-3	-2	0	86.7
	-1	-5	+1	-3	-1	0	85.2		-1	-4	+1	-3	-2	0	89.1
	0	-5	+1	-3	-1	0	83.9		0	-4	+1	-3	-2	0	88.1
	-1	-4	+1	-3	-1	0	81.7		+1	-4	+1	-3	-2	0	87.3
	-1	-4	+2	-3	-1	0	84.0		-1	-3	+1	-2	-2	0	88.1
	-1	-5	+1	-4	0	0	82.7		-2	-4	+2	-2	-2	0	88.3
	-1	-5	+2	-4	0	0	85.2		-1	-5	0	-4	-1	0	87.6
	0	-5	-2	-4	-2	+1	82.1		0	-5	0	-4	-1	0	86.2
	-1	-5	-1	-4	-2	+1	85.6		-1	-5	+1	-4	-1	0	90.0
	0	-5	-1	-4	-2	+1	84.2		0	-5	+1	-4	-1	0	88.6
	+1	-5	-1	-4	-2	+1	83.0		+1	-5	+1	-4	-1	0	87.6
	+2	-5	-1	-4	-2	+1	82.2		0	-4	+2	-4	-1	0	87.7
	0	-4	-1	-4	-2	+1	81.0		-2	-5	+1	-3	-1	0	86.8
	+1	-5	0	-4	-2	+1	85.2		-2	-5	+2	-3	-1	0	89.2
	0	-4	0	-4	-2	+1	83.1		-1	-5	0	-4	-2	+1	87.8
	+1	-4	0	-4	-2	+1	82.3		0	-5	0	-4	-2	+1	86.3
	0	-4	+1	-4	-2	+1	85.3		-1	-5	+1	-4	-2	+1	90.0
	-1	-5	-1	-3	-2	+1	81.0		-2	-5	+1	-3	-2	+1	87.0
	-1	-5	0	-3	-2	+1	83.1	91~95	+1	-5	0	-1	-2	-2	95.4
	0	-5	0	-3	-2	+1	81.7		0	-4	+1	-1	-2	-2	95.5
	-1	-4	+1	-3	-2	+1	81.9		-1	-3	+2	-1	-2	-2	95.7
	-2	-5	0	-4	-1	+1	81.9		-1	-5	0	0	-2	-2	93.2
	-1	-5	+1	-4	-1	+1	82.4		-1	-5	+1	0	-2	-2	95.9
	-2	-5	0	-4	-2	+2	82.9		0	-5	+1	0	-2	-2	94.8
	86~90	+1	-5	-1	-2	-1	88.8		-2	-4	+1	0	-2	-2	93.3
		0	-4	0	-2	-1	89.0		-1	-4	+1	0	-2	-2	92.3
		-1	-5	0	-1	-2	89.2		-1	-4	+2	0	-2	-2	94.9
		0	-5	0	-1	-2	88.0		-2	-3	+2	0	-2	-2	92.4
		0	-5	+1	-1	-2	90.5		-2	-3	+3	0	-2	-2	95.1
		-2	-4	+1	-1	-2	89.3		-2	-5	+1	-1	-1	-2	94.1
		-1	-4	+2	-1	-2	88.1		-1	-5	+1	-1	-1	-2	92.7
		-1	-4	0	-1	-2	90.6		-1	-5	+2	-1	-1	-2	95.5
		0	-5	0	-3	-2	86.1		-2	-4	+2	-1	-1	-2	92.8
		-1	-5	+1	-2	-1	90.1		-2	-4	+3	-1	-1	-2	95.6
		-2	-5	+1	-2	-1	90.1		-2	-5	+2	-2	0	-2	94.2
		-1	-5	+1	-2	-1	88.6		+2	-5	-1	-3	-2	-1	92.6

Loss 階 級	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	Loss	Loss 階 級	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	Loss
91~95	-1	-5	0	-3	-2	-1	95.9	96~100	-1	-5	+3	-3	0	-2	100.5
	+1	-4	0	-3	-2	-1	92.7		-2	-5	+3	-2	0	-2	97.1
	-1	-5	0	-2	-2	-1	93.5		0	-5	0	-3	-2	-1	96.9
	0	-5	0	-2	-2	-1	92.3		-1	-5	+1	-3	-2	-1	100.9
	+1	-5	0	-2	-2	-1	91.3		0	-5	+1	-3	-2	-1	99.6
	0	-5	+1	-2	-2	-1	94.8		+1	-5	+1	-3	-2	-1	98.6
	+1	-5	+1	-2	-2	-1	93.9		0	-4	+1	-3	-2	-1	96.0
	-1	-4	+1	-2	-2	-1	92.4		0	-4	+2	-3	-2	-1	98.7
	0	-4	+1	-2	-2	-1	91.5		-2	-5	+1	-3	-2	-1	97.7
	-1	-4	+2	-2	-2	-1	95.0		-1	-5	+1	-2	-2	-1	96.1
	0	-4	+2	-2	-2	-1	94.0		-2	-5	+2	-2	-2	-1	100.3
	-1	-5	+1	-1	-2	-1	91.7		-1	-5	+2	-2	-2	-1	98.7
	-2	-5	+2	-1	-2	-1	95.7		0	-5	+2	-2	-2	-1	97.5
	-2	-4	+2	-1	-2	-1	91.8		0	-5	+1	-4	-1	-1	96.9
	+1	-5	0	-4	-1	-1	93.2		0	-5	+2	-4	-1	-1	99.7
	-1	-5	+1	-3	-1	-1	93.3		0	-5	+1	-4	-2	-5	96.3
	0	-5	+1	-3	-1	-1	92.0	101~105	0	-5	+1	-2	-2	-2	103.5
	+1	-5	+1	-3	-1	-1	91.0		+1	-5	+1	-2	-2	-2	102.6
	-1	-5	+2	-3	-1	-1	95.9		+1	-5	+2	-2	-2	-2	105.5
	0	-5	+2	-3	-1	-1	94.7		0	-4	+2	-2	-2	-2	102.7
	0	-4	+2	-3	-1	-1	91.2		0	-4	+3	-2	-2	-2	105.6
	-2	-5	+2	-2	-1	-1	92.7		-2	-5	+1	-1	-2	-2	101.6
	-1	-5	+2	-2	-1	-1	91.2		-2	-5	+2	-1	-2	-2	104.4
	0	-5	+2	-4	0	-1	92.3		-1	-5	+2	-1	-2	-2	102.9
	0	-5	0	-4	-2	0	93.8		0	-5	+2	-1	-2	-2	101.8
	+1	-5	0	-4	-2	0	92.7		-1	-5	+3	-1	-2	-2	105.8
	+1	-5	+1	-4	-2	0	95.2		-1	-4	+3	-1	-2	-2	101.9
	-2	-5	0	-3	-2	0	92.0		0	-4	+3	-1	-2	-2	101.1
	-1	-5	+1	-3	-2	0	92.7		-2	-5	+3	0	-2	-2	102.7
	0	-5	+1	-3	-2	0	91.4		0	-5	+2	-3	-1	-2	103.7
96~100	+2	-5	0	-2	-2	-2	99.2		-2	-5	+2	-2	-1	-2	101.5
	0	-4	+1	-2	-2	-2	99.9		-1	-5	+3	-2	-1	-2	102.9
	+1	-4	+1	-2	-2	-2	99.3		0	-5	+3	-2	-1	-2	101.7
	0	-5	0	-1	-2	-2	96.2		0	-5	+2	-4	0	-2	101.5
	-1	-5	+1	-1	-2	-2	100.1		0	-5	+1	-4	-2	-1	104.7
	0	-5	+1	-1	-2	-2	99.0		-1	-5	+2	-3	-2	-1	103.6
	+1	-5	+1	-1	-2	-2	98.1		0	-5	+2	-3	-2	-1	102.3
	-1	-4	+1	-1	-2	-2	96.4		+1	-5	+2	-3	-2	-1	101.3
	+1	-5	+2	-1	-2	-2	100.9		-2	-5	+3	-2	-2	-1	103.0
	-1	-4	+2	-1	-2	-2	99.1		0	-5	+3	-4	-1	-1	102.5
	0	-4	-2	-1	-2	-2	98.3	106~100	-1	-5	+2	-2	-2	-2	107.6
	-1	-5	+2	0	-2	-2	98.6		0	-5	+2	-2	-2	-2	106.4
	0	-5	+2	0	-2	-2	97.5		-1	-5	+3	-2	-2	-2	110.6
	-2	-4	+2	0	-2	-2	96.0		0	-5	+3	-2	-2	-2	109.3
	-2	-4	+3	0	-2	-2	98.7		-2	-5	+3	-1	-2	-2	107.2
	-1	-4	+3	0	-1	-2	87.7		0	-5	+3	-3	-1	-2	106.7
	0	-5	+1	-3	-1	-2	100.8	111~115	0	-5	+3	-3	-2	-2	114.4
	+1	-5	+1	-3	-1	-2	99.8								
	-1	-5	+1	-2	-1	-2	97.2								
	0	-5	+1	-2	-1	-2	96.0								
	-1	-5	+2	-2	-1	-2	100.0								
	0	-5	+2	-2	-1	-2	98.8								
	-1	-4	+2	-2	-1	-2	96.1								
	-2	-5	+2	-1	-1	-2	96.9								
	-2	-5	+3	-1	-1	-2	99.7								
	-1	-5	+2	-1	0	-2	97.6								

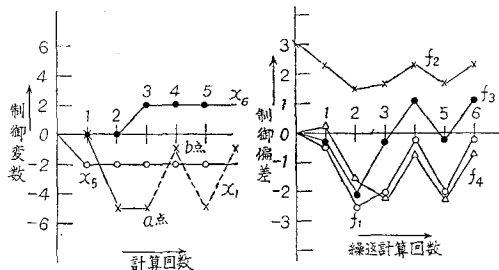
附録3 目的関数を含んだ判定関数を使用した場合のハンチング現象について

第4.2表の計算ケースNo.2で判定関数 $E(x_j)$ を(附3-1)のようにして計算した場合のハンチング現象を示す。

$$E(x_j) = \sum_{i=1}^4 k_i f_i^2 + k_e \sum_{k=1}^4 r_k (G_{ok} + g_k)^2 \dots (\text{附3-1})$$

但し, $k_i = f_i^2$, $k_e = 1$

この場合調整すべき制御変数を $\partial E(x_j)/\partial x_j$ の絶対値によって求め, その調整量を $\partial E(x_j)/\partial x_j = 0$ により求めると附3-1図が得られる。



附3-1図 計算例

この図から解るように, 三回目以後の計算では x_1 だけが調整され, -1 と -5 の値を交互にとり, ハンチング現象を呈している。いま点線で示したa点で $\partial E(x_j)/\partial x_j$ の絶対値を計算すると,

$$\partial E(x_j)/\partial x_1 = 15.94, \quad \partial E(x_j)/\partial x_4 = 2.621$$

$$\partial E(x_j)/\partial x_2 = 1.063, \quad \partial E(x_j)/\partial x_5 = 4.143$$

$$\partial E(x_j)/\partial x_3 = 0.608, \quad \partial E(x_j)/\partial x_6 = 2.171$$

したがって, $\partial E(x_j)/\partial x_j$ の絶対値が最大になる x_j は x_1 であり, 求めるべき Δx_1 の値は,

$$\Delta x_j = - \frac{\sum_{i=1}^n a_{ij} k_i f_i + \sum_{k=1}^K a_{kj} r_k G_k}{\sum_{i=1}^n a_{ij} f_i^2 k_i + \sum_{k=1}^K a_{kj}^2 r_k}$$

によって計算でき, その値は $\Delta x_1 = 4.35$ となる。制御変数 x_j の整数化には四捨五入を採用しているので, a点で x_1 を調整すべき値は, $[\Delta x_1] = 4$ となる。このときの判定関数 $E(x_j)$ をグラフに示すば附3-2図 $E_{1a}(x_j)$ のようになる。次に, $\Delta x_1 = 4$ を各式に代入し, b点での $\partial E(x_j)/\partial x_j$ の絶対値を計算してみると,

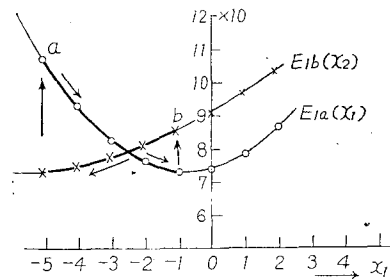
$$\partial E(x_j)/\partial x_1 = 4.924, \quad \partial E(x_j)/\partial x_4 = 4.002$$

$$\partial E(x_j)/\partial x_2 = 2.994, \quad \partial E(x_j)/\partial x_5 = 3.280$$

$$\partial E(x_j)/\partial x_3 = 2.514, \quad \partial E(x_j)/\partial x_6 = 2.206$$

したがって, b点で操作すべき制御変数 x_j はa点の場合と同様 x_1 , となる。このときの判定関数は附3-2図に示すように $E_{1b}(x_j)$ となる。

b点で操作すべき制御変数 Δx_1 を求めると, $\Delta x_1 =$



附3-2図 判定関数 $E(x_j)$ の変化状態

$$E_{1a}(x_1) = 1.83(x+5)^2 - 15.78(x+5) + 107.1$$

$$E_{1b}(x_1) = 0.41(x+1)^2 + 4.836(x+1) + 85.72$$

-4.5 となり $[\Delta x_1] = -5$ となる。しかし x_1 の調整し得る下限が -5 であり, b点の位置が -1 であるから, $[\Delta x_1]$ のとり得る値は -4 となり, 再びa点に戻りハンチング現象を起すことになる。

附録4 負荷時電圧調整器の適正タップ間隔について

本文の中で適正規模の送電系統を1グループとし, その系統内の電圧無効電力を計算機制御する場合解決しなければならない問題点の1つとして, 負荷時電圧調整器のタップ巾およびタップ数のあることを示した。これまで負荷時電圧調整器の設置に当っては, その都度系統条件, タップ切換上の問題などを勘案して調整巾およびタップ数を決定したようであるが, ここでは, 電圧変動を時系列的に取扱い, タップ操作実施後の電圧変動の標準偏差とタップの動作回数に着目して, 適正なタップ間隔を求めた。

(1) 負荷時電圧調整器のタップ間隔の表現

負荷時電圧調整器, 調相設備あるいは発電機の無効電力調整などによって生ずる i 地点の電圧変化 V_i は, 系統特性定数を使用すれば次の式で表わされる。

$$\Delta V_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} \Delta n_j + b_{ij} \Delta y_j + c_{ij} \Delta Q_{gj}) \dots (\text{附4-1})$$

ΔV_i ; 各調整装置操作による i 地点の電圧変化量

Δn_j ; j 地点のL.R.C.タップ操作量

Δy_j ; j 地点の静止形調相設備の操作量

ΔQ_{gj} ; j 地点の発電機無効電力操作量

従って, i 地点のL.R.C.タップ操作による i 地点の電圧変化は

$$\Delta V_i = a_{ii} \Delta n_i \dots (\text{附4-2})$$

となる。ここに, a_{ij} の単位は, 通常($\%V/\%V$)であり, $1\%V$ のタップ操作を実施した場合の電圧変化量($\%V$)に相当するものである, ところが, 一般にL.R.C.の1タップ間隔は $V_T(\%V)$ であるから, 1タップ操作による電圧の変化量 ΔV_{i0} は,

$$\Delta V_{i0} = a_{ii}(\%V/\%V) V_T(\%V) \cdots \cdots (\text{附4—3})$$

となる。ここで、 $\Delta V_{i0}(\%V)$ をその地点の電圧許容変動範囲 $\varepsilon_i(\%V)$ の関数で示し、

$$\Delta V_{i0}(\%V) = \alpha \varepsilon_i(\%V) \cdots \cdots (\text{附4—4})$$

とすれば、(附4—3) 式は

$$\Delta V_{i0} = \alpha \varepsilon_i(\%V) = a_{ii}(\%V/\%V) V_T(\%V) \cdots \cdots (\text{附4—5})$$

となる。故に1タップ間隔 $V_T(\%V)$ は、

$$V_T(\%V) = \frac{\alpha \varepsilon_i(\%V)}{a_{ii}(\%V/\%V)} \cdots \cdots (\text{附4—6})$$

で表わされる。ところで、 ε_i 、 a_{ii} は負荷時電圧調整器を設置すべき地点については既知であるから、L. R. C. 適正タップ間隔を選定することは、適正な α の値を選定することに外ならない。この α の値をタップ定数(仮称)と呼ぶことにする。この α の値を求めることが、L. R. C. の最適タップ間隔を求めることになる訳である。筆者がこの問題を検討したのは昭和36年であり、その当時動作寿命回数が2万～5万回と言われ、一日平均50回程度動作するとすれば使用年数はほぼ1～3年程度となる。このためL. R. C. のタップ切換動作回数を減少して、かつ電圧変動を少なくすることが考えられた。ここで筆者は前述のタップ定数を定義し、調整動作回数を少なくして、かつ電圧計算機およびデジタル計算機で検討した。

(2) 解析方法と結果

前述のように、この検討にはアナログ計算機とデジタル計算機を使用し、データには電圧変動の実測結果を使用した。

電圧変動を連続量として取扱った場合はアナログ計算機を使用し、電圧変動を一定時間間隔でサンプリングした場合にはデジタル計算機を使用し、調整後の電圧変動の標準偏差と調整動作回数を求めた。

この結果、調整後の標準偏差および調整動作回数から考えて、タップ定数 α の適正值は1.2近傍で1.0～1.4の値が適切であるという結論を得た。

したがって、適正なタップ間隔は、

$$V_T = (1 \sim 1.4) \varepsilon_i / a_{ii} \approx 1.2 \varepsilon_i / a_{ii}(\%V) \cdots \cdots (\text{附4—7})$$

となるので、負荷時電圧調整器設置点の許容電圧変動範囲 $\varepsilon(\%V)$ と、その地点の系統特性定数 $\alpha(\%V/\%V)$ とから V_T が求められることとなる。

ところで、一次変電所などでは、変電所の両側に発電機が存在し、系統特性定数は、一般に $\alpha < 0.5\%V$ である。また $\varepsilon > 1\%V$ と考えられるから、適正なタップ間隔 V_T は、

$$V_T > 1.2 \times \frac{1.0}{0.5} \approx 2.5(\%V) \cdots \cdots (\text{附4—8})$$

となり、従来の負荷時電圧調整器のタップ間隔0.5～2.0%Vに比べるとかなり大きい値となる。これがタップの動作回数と調整後の電圧変動の標準偏差とから検討した結果であり、タップ間隔についての一側面よりの検討であるから、系統運用上の諸問題を検討して、タップ定数を決めることが必要である。

一方この結論を現時点で考えてみると、その動作回数も2～5万回より20～30万回と年々増加し、更に増加する傾向にある。このように動作回数が増加し、信頼度が増し、その動作費用が安価になるにつれ、タップ間隔の問題はあまり論じられなくなり、電圧無効電力の計算機制御を実施する場合L. R. C. の動作回数は考慮されなくなるものと考えられる。

附録5 系統特性定数を制御実績から逐次求める方法

系統特性定数 a_{ij} は想定されているいくつかの代表的系統条件に対して、実測あるいは交流計算盤によって求め、実際の制御に当っては系統条件に応じて適宜それに対応する定数を採用するという方法が最も簡単であり、実用上さしたる問題も生じないものと考えられる。

しかし厳密には、測定誤差、計算誤差などのために実際の系統特定数と計算に使用した値とが必ず一致しているとは期待し得ず、わずかの系統変更や潮流変化によっても系統定数は変化する。したがって、いくら精密な計算を行っても満足すべき制御結果が得られないような事態が発生しないとも限らない。このような事態を避けるためには、たえず系統定数を監視し、制御実施毎に制御結果から、系統定数を修正して行くという方法が必要になる。

以下このような場合、系統特定数を求める二方法を示す。

(A法) 各調整設備を計算結果に基いて同時に操作する場合

いま、

f_i ; i 地点の制御実施直後の制御量偏差(実測)

f_{di} ; i 地点の制御実施直前の制御量偏差(実測)

f_j ; j 地点の調整設備操作量

a_{ij} ; 系統特性定数

とすれば、本文にも示したように、次の式が成立する。

$$f_i = f_{di} + \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \cdots \cdots (\text{附5—1})$$

また制御実施回数を k 回目とし、これを(附5—1)に示した各変数の右肩に附すると次のようになる。

$$f_i^k = f_{di}^k + \sum_{j=1}^J a_{ij} x_j^k \dots\dots\dots (\text{附5—2})$$

ここで、次の制御すなわち、 $k+1$ 回目の制御のときの a_{ij} を求める訳であるが、 i 地点に着目すると a_{ij} は調整設備の数だけ、すなわち J 個存在するから、これらを求めるためには附5—2式について J 個のデータを必要とする。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} f_i^{k_1} &= f_{di}^{k_1} + \sum_{j=1}^J a_{ij} x_j^{k_1} \\ f_i^{k_1+1} &= f_{di}^{k_1+1} + \sum_{j=1}^J a_{ij} x_j^{k_1+1} \\ &\dots\dots\dots \\ f_i^{k_1+J-1} &= f_{di}^{k_1+J-1} + \sum_{j=1}^J a_{ij} x_j^{k_1+J-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (\text{附5—3})$$

これを一般式で示せば、

$$\left. \begin{aligned} [f_i^k] &= [f_{di}^k] + [a_{ij}] [x_j^k] \\ k &= k_1 \sim k_1 + J - 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (\text{附5—4})$$

この多元連立一次方程式を解けば、 a_{ij} が求められる。この計算を制御地点の数 $i=1 \sim J$ だけ実施すればよい。これを $k+1$ 回目の系統特性定数として使用する。

$k+2$ 回目の計算に使用する系統特性定数は上記の方法と同様に求めるが、 $k_1+1 \sim k_1+J$ までの値を使用する。すなわち k_1 回目のデータはすべて、その代りに新たに k_1+J 回目のデータを採用する。このように逐次新しいデータを採用して、Adaptive に a_{ij} を求めて行けば、そのときの系統定数を適合した a_{ij} の値を計算に使用することができる。

(B法) 各調整設備を1個所ずつ時間間隔をおいて操作する場合

計算結果に基づいて調整設備を操作する場合、1個所ずつある時間間隔をおいて操作するということが許されれば、系統定数の求め方が非常に簡単になる。すなわち、ある時点における操作を考えると、そのときに操作する調整設備は1個所であるから、(1)式において他の調整設備の項はなくなり

$$f_i = f_{di} + a_{ij} x_j \dots\dots\dots (\text{附5—5})$$

となる。これから簡単に、

$$a_{ij} = (f_i - f_{di}) / x_j \dots\dots\dots (\text{附5—6})$$

とて a_{ij} が求められる。これを透次次の計算の際の系統特性定数として使用すればよい。しかし、一回だけの操作で a_{ij} を決めてしまうと、たまには何らかの原因で測定上の誤差が含まれる可能性もあるので、これを避けるためには、

$$a_{ij} = \sum_{k=k_1}^{k_1+K-1} (f_i^k - f_{di}^k) / x_j^k K \dots\dots\dots (\text{附5—7})$$

但し、 K ；操作回数
とすればよい。

参 考 文 献

1. 差出 電力系統における電圧無効電力制御の展望、給電専門委員会資料 No.47
2. 久保木 仙台変電所における電圧無効電力の総合自動制御について、電力、昭和36年2月号
3. 内藤、久保木 超高压新潟変電所における電圧無効電力の総合自動制御について、日本電気協会研究会、昭和37年5月
4. 木村 系統電圧の自動制御について、日本電気協会研究全、昭和37年5月
5. 中前 自動無効電力調整器(A. Q. R.)とその適用について、電気学会誌、昭和37年12月号
6. 尾出 電力系統における周波数自動制御に関する研究、電力中央研究所研究報告、昭和36年8月
7. 無効電力配分合理化委員会 送電系統における無効電力配分合理化に関する研究、電力中央研究所所報、昭和31年12月
8. 配電線無効電力配分合理化委員会 配電系統における無効電力配分合理化に関する研究報告、電力中央研究所所報、昭和34年9月
9. Hans Graner. Spannungs-und Blindleistungsregelverfahren für gekuppelte Wechsel-Oder Drehstromnetze in Analogie zu der einfachsten Artender Netzkennliuinenregelung. E. T. Z. 1962 P282~291
10. Max Erich, Anforderungen den Netze an die Regelung von Spannung und Blindleistung. E. T. Z. 1960. 2
11. エヌ・アー・パース他 変電所における自動電圧調整、1961年
12. 経済運用委員会 電力系統の経済運用に関する研究、電力中央研究所技研報告、昭和37年3月
13. 西山 電圧無効電力の総合自動制御方式の研究、第2報、電圧変動特性について、電力中央研究所依頼研究報告、昭和39年2月
14. 西山 電力系統の電圧変動特性について、電気学会、電力系統工学専門委員会、昭和40年2月
15. 西山 電圧変動特性について、電力中央研究所レポート、昭和39年
16. 西山 電圧無効電力の総合自動制御方式の研究、第3報、配電用変電所の電圧無効電力の変動特性

- について，電力中央研究所依頼研究報告，昭和40年2月
17. 豊田 理想的移動平均法について，経済運用委員会資料 No.135
 18. 西山 電圧無効電力の総合自動制御方式の研究，第1報，系統特性定数，電力中央研究所依頼研究報告，昭和38年9月
 19. 梅津 電力系統における電圧調整方式に関する研究，電力中央研究所技研報告，昭和36年12月
 20. 西山 負荷時電圧調整器の適正タップ間隔について，電気学会昭和37年東京支部大会
 21. 西山 負荷時電圧調整器の適正タップ間隔について，電力中央研究所技研報告，昭和37年12月
 22. 西山 負荷時電圧調整器の適正タップについて，日科技連，アナログ技術研究会，昭和38年2月
 23. 西山 系統電圧の計算機制御に関する研究，電気学会，昭和37年東京支部大会
 24. 西山 系統電圧の計算機制御に関する研究，電力中央研究所所報，昭和37年12月
 25. 西山 系統電圧の計算機制御について，（系統特性定数），昭和83年電気4学連合大会
 26. 西山 系統電圧の計算機制御について，（LP的手法による解法の開発），昭和38年電気学連合大会
 27. 西山 系統電圧の変動特性について，昭和39年電気4学連合大会
 28. 西山 系統電圧の計算機制御に関する基礎理論，電気学会誌，昭和39年1月号
 29. H. D. Bickely Digital techniques for voltage regulation Studies, Automatic Control, 1961—2
 30. M. W. Gangel 32-Step Voltage-Regulator Performance, Power Apparatus. 1961—10